

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VINICIUS MORAIS COUTINHO

DEFINIÇÃO DE UNIDADES DE MANEJO PARA POVOAMENTOS DE ACÁCIA-
NEGRA (*Acacia mearnsii* De Wild.) POR MEIO DE GEOESTATÍSTICA E ANÁLISE
MULTIVARIADA

CURITIBA

2018

VINICIUS MORAIS COUTINHO

DEFINIÇÃO DE UNIDADES DE MANEJO PARA POVOAMENTOS DE ACÁCIA-
NEGRA (*Acacia mearnsii* De Wild.) POR MEIO DE GEOESTATÍSTICA E ANÁLISE
MULTIVARIADA

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Florestal, no Curso de Pós Graduação em
Engenharia Florestal, Área de concentração de
Manejo Florestal, Setor de Ciências Agrárias,
Universidade Federal do Paraná.

Orientador:
Prof. Ph.D. Carlos Roberto Sanquetta

Co-orientadores:
Prof. Dra. Ana Paula Dalla Corte
Prof. Dr. Alexandre Behling

CURITIBA

2018

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Coutinho, Vinicius Morais

Definição de unidades de manejo para povoamentos de acácia-negra
(*Acacia mearnsii* De Wild.) por meio de geoestatística e análise
multivariada / Vinicius Morais Coutinho. – Curitiba, 2018.
149 f. : il.

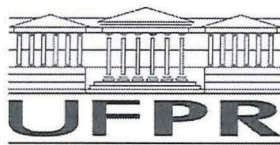
Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta
Coorientadores: Profa. Dra. Ana Paula Dalla Corte
Prof. Dr. Alexandre Behling

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
Defesa: Curitiba, 02/03/2018.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Povoamento florestal – Métodos estatísticos. 2. Acácia. 3.
Produtividade florestal. 4. Manejo florestal. 5. Teses. I. Sanquetta, Carlos
Roberto. II. Dalla Corte, Ana Paula. III. Behling, Alexandre. IV.
Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9
CDU – 634.0.52



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **VINICIUS MORAIS COUTINHO** intitulada: **DEFINIÇÃO DE UNIDADES DE MANEJO PARA POVOAMENTOS DE ACÁCIA-NEGRA (*Acacia mearnsii* De Wild.) POR MEIO DE GEOESTATÍSTICA E ANÁLISE MULTIVARIADA**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 02 de Março de 2018.

ANA PAULA DALLA CORTE

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

FRANCELO MOGNON

Avaliador Externo (IAP)

ALLAN LIBANIO PELISSARI

Avaliador Externo (UFPR)



Aos meus pais Fátima e Francisco,
Às minhas irmãs amadas: Karina e Fernanda,
Aos meus avós maternos Dejair e Raul (*in memorian*).
Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e pelas imensuráveis bençãos!

À minha família pelo incentivo, amor e paciência, aos meus pais Fátima e Francisco, que me mostram a cada dia o quanto sou abençoado por tê-los em minha vida!

Aos meus queridos tios, pelo apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao Kelvin Rodrigues, por todo o carinho, companheirismo e pelo apoio em todos os momentos difíceis.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, pela possibilidade de cursar o mestrado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta, pela brilhante orientação, pelo incentivo à carreira acadêmica e pelos ensinamentos a mim transmitidos.

Aos meus co-orientadores, Prof^a. Dr^a. Ana Paula Dalla Corte e Prof. Dr. Alexandre Behling, por todos os auxílios e contribuições para a execução e elaboração deste trabalho.

Aos pesquisadores Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho, Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari, Prof^a. Dr^a. Christel Lingnau, Prof. Dr. Julio Eduardo Arce, Prof. Dr. Paulo Justiniano Ribeiro e ao Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado, por todo o conhecimento adquirido em suas disciplinas.

Aos professores Dr. Alessandro Camargo Ângelo, Dr. José Henrique Pedrosa Macedo e ao Msc. Décio José Figueiredo pela grande amizade construída ao longo desses anos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À empresa TANAGRO S/A e a toda sua equipe técnica, especialmente ao senhor Augusto A. Simon, que nos forneceram todo o banco de dados e não mediram esforços para nos auxiliar em nossos trabalhos.

Aos colegas de pós-graduação, em especial: Bruna Vasconcellos, Karen Aline, Linamara Ferrari, Luciellen Martins, Marieli Ruza, Myrcia Minatti, Rafael Brown, Samuel Silva e Thiago de Oliveira, pelo companheirismo durante estes dois anos de convívio.

Aos casais de amigos Deivison Souza e Joielan Xipaia, Aurélio Rodrigues e Dhyone Schinemann, Maria Emília Ferreira e Paulo Afonso Costa, pela amizade e agradáveis momentos de convívio.

Aos meus grandes amigos Ana Beatriz Bertani, Luani Piva, Mateus Sanquetta, Nathalia Rodrigues, Raísa Oliveira, Regina Kramar, Rorai Neto, Thiago Meyer, Vinícius de Moraes e aos demais amigos, por tornarem mais leves os momentos difíceis.

Aos originais, Alexandre Baumel, César Padilha, Fábio Brito, Jean Ribeiro, João Martins, Marcelo Luvizotto, Milton Strapasson, Ricardo Camargo, Thiago Garcia, Vitor Bertolucci e Winicius Schaeffer pela forte amizade construída.

E, a todos que me incentivaram para a realização deste curso de Pós-Graduação.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial produtivo e definir Unidades de Manejo em plantios comerciais de acácia-negra, por meio da estruturação de banco de dados do meio físico, capaz de integrar as informações numéricas e espaciais, mediante o uso de técnicas estatísticas multivariadas e geoestatísticas, fornecendo subsídios para um melhor conhecimento potencial da espécie e para o uso sustentado das terras. Para isso, o presente estudo foi conduzido em plantio comercial de acácia-negra situado no município de Cristal, localizado na região da Encosta do Sudeste, no estado do Rio Grande do Sul, e constituído por três povoamentos seminais implantados nos anos de 2003, 2004 e 2005, perfazendo o total de 939,1 hectares de efetivo plantio. Os dados dendrométricos foram coletados em 91 unidades amostrais, nas quais foram também coletadas as variáveis do meio físico. As espacializações do Índice de Sítio (IS₇) e das medidas de variabilidade foram utilizadas como diferentes estratégias para definição das Unidades de Manejo. As medidas de variabilidade utilizadas foram os desvios padrões das variáveis dap (desvDAP), ht (desvHT), g (desvg), V (desvVOL) e o índice de uniformidade (PV50) do plantio. A dependência espacial para a variável Índice de Sítio, aos sete anos de idade, foi considerada fraca (8,6 %), portanto, não justificando a modelagem geoestatística para essa variável. Entre as medidas de variabilidade, o melhor resultado foi encontrado utilizando o PV50, cuja dependência espacial foi considerada forte (78,72 %). Os resultados revelam que o modelo geoestatístico exponencial permitiu visualizar o comportamento do PV50, possibilitando definir três classes de uniformidade: I) 14,119 – 23,119; II) 10,113 – 14,119 e III) 1,112 – 10,113. O estudo também mostrou que há uma tendência em locais onde a altitude e o teor de matéria orgânica (MO) são maiores apresentarem maiores valores para o PV50. Sendo assim, conclui-se que as Unidades de Manejo para acácia-negra podem ser aplicadas no estudo da relação entre o índice de uniformidade (baseado no PV50) e atributos do meio físico (altitude e matéria orgânica do solo), possibilitando definir a espacialização de três Unidades de Manejo diferenciadas para acácia-negra, de acordo com as classes de PV50.

Palavras-chave: Índice de Sítio, medidas de variabilidade, classes de uniformidade

ABSTRACT

Therefore, the objective of this work was to study the productive potential and to define management units in Black Wattle commercial plantations, by means of the database structure of the physical environment, capable of integrating the numerical and spatial information, through the use of multivariate and geostatistical techniques, providing subsidies for a better potential knowledge of this species and for sustained land use. For this, the present study was carried out in a commercial plantation of Black Wattle located in the region of Encosta do Sudeste, state of Rio Grande do Sul, and consisting of three seminal stands implanted in 2003, 2004 and 2005, making a total of 939,1 hectares of effective planting. The dendrometric data were collected in 91 sample units, in which the variables of the physical environment were also collected. Spatialisations of the Site Index (IS_7) and variability measures used as different strategies for the definition of Management Units. The variability measures used were the standard desviations of the variables dap (desvDAP), ht (desvHT), g (desvg), V (desvVOL) and the uniformity index (PV50) of the stand. The spatial dependence for the Site Index, at seven years, was considered weak (8,6 %), therefore, not justifying the geostatistical modeling for this variable. Among the measures of variability, the best search result was found using the PV50, whose spatial dependence was considered strong (78,72 %). The results show that the exponential geostatistical model allowed to visualize the behavior of the PV50, allowing to define three classes of uniformity: I) 14,119 – 23,119; II) 10,113 – 14,119 e III) 1,112 – 10,113. The study also showed that there is a tendency in places where altitude and organic matter content (MO) are higher present higher values for the PV50. Thus, it can be concluded that the management units for Black Wattle can be applied in the study of the relationship between the uniformity index (based on the PV50) and attributes of the physical environment (altitude and soil organic matter), making it possible to define spatialization of three different Management Units for Black Wattle, according to the classes of PV50.

Keywords: Site Index, measures of variability, uniformity classes

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UM SEMIVARIOGRAMA REPRESENTATIVO E SEUS PARÂMETROS	42
FIGURA 2.	DISTRIBUIÇÃO MÉDIA MENSAL DE PRECIPITAÇÃO, TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL	49
FIGURA 3.	LOCALIZAÇÃO DAS UNIDADES AMOSTRAIS SITUADAS NA FAZENDA OURO VERDE, PROPRIEDADE DA TANAGRO S.A....	51
FIGURA 4.	FLUXOGRAMA DA OBTENÇÃO DOS DADOS COLETADOS EM PARCELAS DE INVENTÁRIO FLORESTAL TEMPORÁRIAS EM PLANTIO COMERCIAL DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL	56
FIGURA 5.	ESTRATÉGIAS PARA DEFINIÇÃO DE UNIDADES DE MANEJO .	74
FIGURA 6.	DISTRIBUIÇÃO DAS FREQUÊNCIAS OBSERVADAS EM CLASSES DE DAP E HT MENSURADOS EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL ...	77
FIGURA 7.	DISPERSÃO ENTRE A HT E O DAP DE ÁRVORES MENSURADAS EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL	78
FIGURA 8.	DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS OBTIDOS A PARTIR DAS 6 MELHORES EQUAÇÕES MATEMÁTICAS EMPREGADAS PARA DESCREVER A RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA	81
FIGURA 9.	DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA OS 6 MELHORES MODELOS HIPSOMÉTRICOS, APÓS EXCLUSÃO DOS VALORES INFLUENTES.....	83
FIGURA 10.	DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS OBTIDOS A PARTIR DAS EQUAÇÕES MATEMÁTICAS EMPREGADAS PARA DESCREVER A RELAÇÃO VOLUMÉTRICA.....	86
FIGURA 11.	CURVAS DAS CLASSES DE SÍTIO EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL	88

FIGURA 12.	AUTOVALOR (λ) CORRESPONDENTE A CADA COMPONENTE PRINCIPAL OBTIDO A PARTIR DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS APLICADA ÀS VARIÁVEIS INDEPENDENTES.....	101
FIGURA 13 -	SEMIVARIOGRAMA AJUSTADO PARA O ÍNDICE DE SÍTIO (IS_7)	108
FIGURA 14.	DENDROGRAMA ILUSTRATIVO DA SIMILARIDADE ENTRE AS PARCELAS DE INVENTÁRIO FLORESTAL, OBTIDO PELO MÉTODO <i>AVERAGE LINKAGE</i>	111
FIGURA 15.	SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA AS VARIÁVEIS DESVDAP, DESVG, DESVHT, DESVVL E PV50.....	113
FIGURA 16.	ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL DESVDAP EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA	114
FIGURA 17.	ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL DESVG EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA	114
FIGURA 18.	ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL DESVVL EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA	115
FIGURA 19.	ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL PV50 EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA	115
FIGURA 20.	SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA AS VARIÁVEIS ARGILA, ALTITUDE E MATÉRIA ORGÂNICA	118
FIGURA 21.	ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL ARGILA EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA	119
FIGURA 22.	ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL ALTITUDE EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA	119
FIGURA 23.	ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL MATÉRIA ORGÂNICA EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA.....	120

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.	MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR A ALTURA EM POVOAMENTOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL	57
TABELA 2.	MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR O VOLUME INDIVIDUAL EM POVOAMENTOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL	58
TABELA 3.	MODELOS TESTADOS PARA AJUSTE DO SEMIVARIOGRAMA	67
TABELA 4.	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA HT E DAP, EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL .	75
TABELA 5.	CORRELAÇÃO ENTRE HT E O DAP, EM SUA FORMA NATURAL E TRANSFORMADA	78
TABELA 6.	ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DE MODELOS HIPSOMÉTRICOS TESTADOS.....	80
TABELA 7.	ESTATÍSTICAS DE AJUSTE PARA OS 6 MELHORES MODELOS HIPSOMÉTRICOS, APÓS EXCLUSÃO DOS VALORES INFLUENTES.....	82
TABELA 8.	CORRELAÇÃO ENTRE VOLUME, DAP E HT, EM SUAS FORMAS NATURAIS E TRANSFORMADAS.....	84
TABELA 9.	ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DE MODELOS VOLUMÉTRICOS TESTADOS.....	85
TABELA 10.	CLASSES DE ALTURA DOMINANTE, À IDADE ÍNDICE DE 7 ANOS EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL	87
TABELA 11.	LIMITES DAS ALTURAS DOMINANTES ESTIMADAS POR IDADE E CLASSE DE SÍTIO EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL.....	88

TABELA 12.	CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS DE POSICIONAMENTO E AS VARIÁVEIS DAP, HT, HDOM, IS_7, V E G94
TABELA 13.	CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS GRANULOMÉTRICAS E AS VARIÁVEIS DAP, HT, HDOM, IS_7, V E G95
TABELA 14.	CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS QUÍMICAS DO SOLO E AS VARIÁVEIS DAP, HT, HDOM, IS_7, V E G98
TABELA 15.	ANÁLISE DE TRILHA ENTRE A MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO E ÍNDICE DE SÍTIO (IS_7)99
TABELA 16.	AUTOVALORES (λ) E PERCENTUAIS DAS VARIÂNCIAS DOS SETE COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDOS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO, R, DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES..... 101
TABELA 17.	ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA UTILIZANDO OS ESCORES DOS 7 PRIMEIROS COMPONENTES PRINCIPAIS OBTIDOS 102
TABELA 18.	COEFICIENTES DO MODELO DE REGRESSÃO UTILIZANDO OS ESCORES DOS 7 PRIMEIROS COMPONENTES PRINCIPAIS OBTIDOS..... 102
TABELA 19.	ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA ATRAVÉS DO MÉTODO STEPWISE UTILIZANDO AS 29 VARIÁVEIS INDEPENDENTES ORIGINAIS 103
TABELA 20.	COEFICIENTES DO MODELO DE REGRESSÃO ATRAVÉS DO MÉTODO STEPWISE UTILIZANDO AS 29 VARIÁVEIS INDEPENDENTES ORIGINAIS..... 103
TABELA 21.	ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DO MODELO EXPONENCIAL AJUSTADO À VARIÁVEL IS_7..... 108
TABELA 22.	ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DO MODELO EXPONENCIAL AJUSTADOS ÀS VARIÁVEIS DESVDAP, DESVHT, DESVG, DESVOL E PV50..... 112
TABELA 23.	ESTATÍSTICAS DO TESTE DE SELEÇÃO DE VARIÁVEIS DISCRIMINANTES PARA PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL..... 116

TABELA 24.	ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DO MODELO EXPONENCIAL AJUSTADOS ÀS VARIÁVEIS ARGILA, ALTITUDE E MATÉRIA ORGÂNICA.....	117
------------	---	-----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	A ACACICULTURA	19
3.2	PRODUTIVIDADE FLORESTAL	21
3.2.1	Fatores ambientais que influenciam a produtividade florestal	23
3.2.1.1	Altitude	24
3.2.1.2	Profundidade efetiva do solo	24
3.2.1.3	Granulometria do solo	25
3.2.1.4	Fertilidade do solo	27
3.3	ÍNDICE DE SÍTIO	29
3.4	UNIDADES DE MANEJO	30
3.5	ANÁLISES ESTATÍSTICAS MULTIVARIADAS	31
3.5.1	Análise de Trilha (<i>Path analysis</i>)	33
3.5.2	Análise de Componentes Principais (ACP)	34
3.5.3	Análise de Agrupamento (<i>Cluster</i>)	36
3.5.4	Análise Discriminante	37
3.6	GEOESTATÍSTICA	37
3.6.1	Conceito e aplicação	37
3.6.2	Semivariograma	40
3.6.3	Interpolação	44
3.6.3.1	Krigagem	44
3.6.3.2	Cokrigagem	46
4	MATERIAL E MÉTODOS	47
4.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	47
4.1.1	Localização	47
4.1.2	Geomorfologia e Geologia	47
4.1.3	Clima	48
4.1.4	Vegetação	49
4.1.5	Solo	49
4.2	ORIGEM DOS DADOS	50

4.2.1	Inventário Florestal	50
4.2.2	Análises químicas e granulométricas.....	51
4.2.2.1	Análises químicas	52
4.2.2.2	Análises granulométricas	55
4.2.3	Tabulação dos dados.....	55
4.3	PROCESSAMENTO DO INVENTÁRIO FLORESTAL	57
4.3.1	Ajuste de equações hipsométricas e volumétricas	57
4.3.2	Índice de Sítio	59
4.4	MODELAGEM DO ÍNDICE DE SÍTIO	59
4.4.1	Análise de Correlação Linear.....	59
4.4.2	Análise de Trilha (<i>Path analysis</i>).....	59
4.4.3	Redução da dimensionalidade dos dados	62
4.4.3.1	Teste de Esfericidade de Bartlett	62
4.4.3.2	Análise de Componentes Principais (ACP).....	63
4.4.4	Regressão Linear Múltipla	64
4.5	ESPACIALIZAÇÃO DO ÍNDICE DE SÍTIO	66
4.6	GRUPOS HOMOGÊNEOS DE PARCELAS DE INVENTÁRIO FLORESTAL	67
4.7	ESPACIALIZAÇÃO DAS MEDIDAS DE VARIABILIDADE.....	71
4.7.1	Medidas de variabilidade das parcelas	71
4.7.2	Análise Discriminante	72
4.7.3	Espacialização das medidas de variabilidade.....	73
4.8	UNIDADES DE MANEJO PARA ACÁCIA-NEGRA.....	73
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
5.1	INVENTÁRIO FLORESTAL	75
5.1.1	Estatísticas descritivas do inventário florestal.....	75
5.1.2	Relação hipsométrica	77
5.1.2.1	Análise de correlação entre as variáveis ht e dap.....	77
5.1.2.2	Ajuste de modelos hipsométricos	79
5.1.3	Relação do volume	84
5.1.3.1	Análise de correlação entre o volume e as variáveis dap e ht	84
5.1.3.2	Ajuste de modelos volumétricos	84
5.1.4	Classificação de sítio	86
5.2	ANÁLISE DOS ATRIBUTOS DO MEIO FÍSICO	89

5.2.1	Interpretação dos resultados das análises das variáveis de posicionamento das parcelas	89
5.2.2	Interpretação dos resultados das análises das variáveis granulométricas	89
5.2.3	Interpretação dos resultados das análises das variáveis químicas do solo	91
5.3	MODELAGEM DO ÍNDICE DE SÍTIO	94
5.3.1	Correlação dos atributos do meio físico sobre o Índice de Sítio	94
5.3.1.1	Efeito das variáveis de posicionamento das parcelas.....	94
5.3.1.2	Efeito das variáveis granulométricas do solo	95
5.3.1.3	Efeito das variáveis químicas do solo	96
5.3.2	Redução da dimensionalidade dos dados	99
5.3.2.1	Adequação da aplicabilidade da Análise de Componentes Principais	99
5.3.2.2	Análise de Componentes Principais entre as variáveis do meio físico ...	100
5.3.3	Análise de Regressão Linear Múltipla.....	101
5.3.3.1	Regressão utilizando os Componentes Principais	102
5.3.3.2	Regressão utilizando as 29 variáveis do meio físico.....	103
5.4	ESPACIALIZAÇÃO DO ÍNDICE DE SÍTIO (IS_7).....	106
5.5	GRUPOS HOMOGÊNEOS DE PARCELAS DE INVENTÁRIO FLORESTAL	110
5.6	ESPACIALIZAÇÃO DAS MEDIDAS DE VARIABILIDADE.....	111
5.6.1	Variáveis do meio físico que determinam os grupos.....	116
5.6.2	Espacialização dos atributos do meio físico que determinam os grupos	117
5.7	UNIDADES DE MANEJO PARA ACÁCIA-NEGRA.....	121
6	CONCLUSÕES.....	123
7	RECOMENDAÇÕES	126
	REFERÊNCIAS.....	127
	APÊNDICES	141

1 INTRODUÇÃO

A acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) é uma espécie florestal de grande importância econômica para estado do Rio Grande do Sul atingindo, no ano de 2015, área plantada de 160.827 ha (IBÁ, 2016). O seu cultivo visa a produção de casca para as indústrias de tanino, geralmente farmacêuticas e coureiras, e, ultimamente produção de madeira como matéria-prima para indústrias de celulose, de aglomerados e de carvão vegetal (SANTOS et al., 2001). Diante disso, é notória a grande contribuição da acacicultura para a economia nacional, devido ao seu rápido crescimento, associado ao aproveitamento quase que integral da árvore, tornando essa espécie ideal para reflorestamentos e uso industrial, com o desenvolvimento de produtos para diversas finalidades. Quanto à importância ambiental da espécie, por se tratar de uma planta pertencente à família Fabaceae (Mimosoideae), a acácia-negra tem grande relevância graças a sua capacidade de fixação de nitrogênio (N_2) e de incorporação da matéria orgânica ao solo, fornecendo proteção à fertilidade deste.

Sabe-se que no Brasil grande parte dos povoamentos florestais, sobretudo de acácia-negra, estão implantados em solos com baixo nível de fertilidade, apesar disso, a espécie tem garantido bom desenvolvimento e grande produtividade nessas regiões. No entanto, essa característica de “grande” produtividade em condições desfavoráveis precisa ser melhor analisada e entendida. Do ponto de vista nutricional, uma espécie é considerada superior quando ela é capaz de desenvolver e ter uma boa produção em condições desfavoráveis de fertilidade do solo, tendo habilidade de absorver os nutrientes necessários em menor quantidade, e/ou, distribuí-los de maneira mais eficiente nos diversos componentes da planta, sem comprometer a produtividade (CALDEIRA; NET; SCHUMACHER, 2004).

Numa mesma região climática, o solo é a característica ambiental que mais influencia a produtividade florestal (PRITCHET, 1990). Entretanto, na maioria dos casos, o estabelecimento de relações diretas entre os atributos do solo e o crescimento florestal não tem tido sucesso (SCHÖNAU; ALDWORTH, 1991). A dificuldade para se encontrar relações entre teores de nutrientes no solo e a produtividade florestal pode estar relacionada com as técnicas de análises da

disponibilidade de nutrientes para as plantas, que foram calibradas para cultivos de ciclo curto, que podem não ser totalmente aplicáveis para cultivos de ciclos longos, como as plantações florestais (MOCHIUTTI, 2007).

A capacidade de um determinado sítio florestal pode ser avaliada de duas formas: por meio da medição de fatores intrínsecos e extrínsecos à biomassa florestal. Como fatores intrínsecos, pode-se avaliar a altura dominante ou média, o crescimento máximo e o volume total ao final da rotação. Os fatores extrínsecos podem ser do biótipo (edafologia, clima, litologia e a morfologia) ou da biocenose (espécies indicadoras e associações indicadoras) (ORTEGA; MONTEIRO, 1998). Portanto, além dos fatores inerentes à espécie, a capacidade produtiva depende, essencialmente, da determinação dos fatores ambientais limitantes ao crescimento da plantação. Todavia, há poucos trabalhos sobre a avaliação da qualidade do ambiente, fundamentais para a formulação de propostas de manejo florestal adequadas.

Segundo Rigatto, Dedeczek e Mattos (2005), a avaliação das potencialidades e dos fatores limitantes para predições da capacidade produtiva do sítio florestal, com base na determinação da qualidade do ambiente, não se apoia somente em atributos isolados, mas em um conjunto de qualidades e limitações do ecossistema. Portanto, ao invés de utilizar apenas os atributos isolados, busca-se interpretar a influência desses e de outras propriedades identificadoras de ambientes em termos de qualidade ou de previsão de potencialidade dos sítios florestais em locais distintos e sob diferentes práticas de manejo. A utilização de técnicas de análises multivariadas pode ajudar na determinação dos fatores do ambiente limitantes ao crescimento florestal e viabilizar alternativas para superação dessas limitações.

Diante da indiscutível importância socioeconômica e ambiental exercida pela acacicultura, este trabalho teve como objetivo estudar a capacidade de crescimento e definir Unidades de Manejo em plantios comerciais de acácia-negra, por meio da estruturação de banco de dados do meio físico, capaz de integrar as informações numéricas e espaciais, mediante o uso de técnicas estatísticas multivariadas e geoestatísticas, fornecendo subsídios para melhor conhecimento do potencial da espécie, para melhor uso dos recursos e para o uso sustentado das terras, possibilitando a prática de intervenções localizadas, como práticas silviculturais e regimes de manejo e colheita.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar numericamente e espacialmente os fatores do meio físico que afetam o potencial produtivo de plantações comerciais de acácia-negra, em diferentes sítios, para definição de Unidades de Manejo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar modelos estatísticos para descrever a relação hipsométrica e volumétrica para plantios comerciais de acácia-negra;
- Definir classes de sítio para o povoamento florestal;
- Caracterizar e avaliar as variáveis de posicionamento, granulométricas e químicas do solo e correlacioná-las com a produtividade florestal de parcelas de inventário florestal; e
- Agrupar e espacializar parcelas de inventário florestal em Unidades de Manejo, por meio de técnicas estatísticas multivariadas e geoestatísticas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A ACACICULTURA

A acácia-negra (*Acacia mearnsii*) é uma espécie pertencente à família *Fabaceae* (Leguminosas), o nome comum faz referência à coloração escura da casca e folhagem (KANNEGIESSER, 1990). É naturalmente encontrada, principalmente, nas terras baixas, nas planícies costeiras e em pequenos declives dos planaltos do sudoeste da Austrália e da Tasmânia, em altitudes que variam desde o nível do mar até 1.070 m (BOLAND et al., 1984). Nestes locais, as precipitações anuais variam entre 450 a 1.600 mm, a temperatura máxima do mês mais quente varia entre 21 e 29 °C e a média mínima do mês mais frio entre -3 e 7 °C, com ocorrência de geadas no inverno (BOLAND et al., 1984; SEARLE, 1997). Em seu ambiente natural atinge entre 6 e 10 m de altura, podendo alcançar até 15 m, é considerada um arbusto grande ou pequena árvore. O caule geralmente é reto e dominante e a casca de árvores adultas é de coloração preto-amarronzada, dura e fissurada (MOCHIUTTI, 2007).

A acácia-negra é a principal fonte de casca para a indústria de taninos, utilizados principalmente no curtimento de couro, os taninos também são utilizados na indústria de chapas de madeira e floculantes para tratamento de água, além de outros produtos como dispersantes, resinas, quelantes e conservantes (SIMON, 2005), também é utilizado na produção de tintas, inibidores de corrosão, promotores de fluxo de líquido em tubos, produtos farmacêuticos, adesivos (SEIGER, 2002) e na clarificação de cervejas e vinhos (FOWLER et al., 2000). Atualmente a madeira da acácia-negra tem como principal destino a produção de celulose e papel, já pontas de troncos, galhos e árvores mortas tem sido aproveitadas para lenha e produção de carvão. A acácia-negra também proporciona serviços ambientais, como a recuperação e proteção dos solos, apresentando perfil ideal para ambientes alterados. É uma eficiente fixadora de nitrogênio e carbono, com grande capacidade de adaptação a diferentes ambientes e habilidade de colonizar áreas que tenham perdido quase todo o solo superficial (KANNEGIESSER, 1990). Segundo Auer e Silva (1992), essa espécie pode fixar até 200 kg.ha.ano⁻¹ de nitrogênio em regiões

tropicais. Além disso, permite a coexistência de outras espécies vegetais no sub-bosque, favorecendo o estabelecimento da fauna silvestre (MÜLLER, 2006).

No Brasil, a acácia-negra é cultivada apenas no Rio Grande do Sul. Os primeiros plantios comerciais, realizados em 1928, foram formados por sementes oriundas da África do Sul e tinham como objetivo a utilização da casca *in natura* pelos curtumes (SCHNEIDER; TONINI, 2003). A partir de 1941, com a instalação de indústrias para processamento de tanino, houve um crescimento da acacicultura na região da Encosta da Serra Geral até o vale do Jacuí, início da Depressão Central, atingindo, em 1969, aproximadamente 50 mil hectares de área plantada (OLIVEIRA, 1968). Na década de 1970 notou-se uma expansão dos plantios em direção ao sul do estado, atingindo a parte sul da Depressão Central, até a década de 1990 as plantações avançaram pela Encosta do Sudeste e a Serra do Sudeste. Segundo Simon (2005), estima-se que sejam plantados anualmente cerca de 30 mil hectares com acácia negra, atingindo, no ano de 2015, área plantada de 160.827 ha (IBÁ, 2016). A maior parte dos plantios é conduzida por pequenos e médios produtores, que detêm em torno de 60% das plantações (MÜLLER, 2006). Em pequenas propriedades, a acácia-negra é cultivada em sistemas agrossilvipastoris.

A acacicultura é uma atividade econômica consolidada e tem trazido relevantes benefícios aos produtores, desempenhando papel importante no setor florestal no estado do Rio Grande do Sul. Atualmente, a produção de casca para a indústria de taninos é considerada um produto secundário devido à redução do seu valor de mercado. Em contrapartida, a madeira ganhou espaço no mercado com sua utilização para a indústria de celulose, chapas e aglomerados. De acordo com Caldeira et al. (2002), a rotação se estende entre 7 e 9 anos de idade, e quando a floresta é colhida se exporta todo o tronco (madeira e casca).

A acácia-negra é uma espécie de rápido crescimento, alcança seu máximo crescimento entre 3 e 5 anos de idade (MOCHIUTTI, 2007). Os plantios comerciais desenvolvem-se bem em solos rasos e nas mais variadas texturas, inclusive em solos argilosos, no entanto, não tolera os mal drenados, hidromórficos e muito úmidos e apresenta reduzido crescimento em solos muito ácidos e de baixa fertilidade (DEDECEK; HIGA, 2003). Tolerar solos pobres em nutrientes, entretanto, requer o fornecimento de nutrientes para um bom crescimento. Maestri et al. (1987), encontraram respostas positivas a adubação fosfatada em solo de baixa fertilidade. Por se tratar de uma espécie pioneira, a acácia-negra coloniza rapidamente

ambientes abertos, com capacidade de estabelecer-se em áreas alteradas e degradadas.

3.2 PRODUTIVIDADE FLORESTAL

A determinação da produtividade florestal é um recurso básico quando o objetivo é aplicar um sistema integrado de manejo visando a racionalização e otimização do uso dos recursos florestais (SILVA et al., 2013). De acordo com Selle (1993), sempre que se pretende implantar um empreendimento florestal numa determinada região, é necessário ter um amplo conhecimento da espécie a ser introduzida, bem como do potencial produtivo do local.

O crescimento das árvores ou o acúmulo de biomassa é influenciado por fatores inerentes à planta (herança genética) e aos fatores ambientais que afetam a fotossíntese e a respiração. Entre os fatores inerentes à planta destacam-se a idade, estrutura e disposição das folhas, distribuição e comportamento dos estômatos, teor de clorofila e acúmulo de hidratos de carbono, já os entre os fatores ambientais que afetam a produtividade florestal destacam-se a luz, temperatura, concentração de dióxido de carbono, umidade e fertilidade do solo, pragas e doenças (KRAMER; KOZLOWSKI, 1979). A distribuição da biomassa nos compartimentos da árvore apresenta mudanças de acordo com a idade da planta. Na fase inicial de crescimento a maior parte da biomassa é alocada na copa, após esse período os fotoassimilados são direcionados principalmente para o desenvolvimento dos tecidos lenhosos e madeira, e finalmente na fase senil a maior parte da produção da biomassa é descartada como serapilheira (BINKLEY; O'CONNEL; SANKARAN, 1997).

Segundo Mochiutti (2007), a herança genética determina o potencial de crescimento, tamanho e longevidade, características do sistema radicular, forma do tronco, densidade da madeira, tolerância à seca e inundação, resistência a doenças e pragas, entre outras. Já o ambiente (fatores climáticos, edáficos, topográficos, competição, práticas silviculturais, etc.) determina a grandeza que o potencial de crescimento pode alcançar, ou seja, a produção de biomassa das árvores normalmente é menor que o potencial máximo de produção, devido a deficiências de água, nutrientes, luz e outros fatores.

Para obter rendimentos quantitativos e qualitativos satisfatórios é necessário utilizar espécies adequadas à ecologia das diferentes regiões, de acordo com as condições potenciais do ambiente. Embora o melhoramento genético florestal tenha possibilitado ganhos de produtividade significativos nas últimas décadas, ganhos futuros dependerão muito mais de manipulações das variáveis ambientais, aliado a seleção de genótipos específicos para cada ambiente, tendo um uso mais eficiente dos recursos ambientais (NAMBIAR; BROWN, 1997). Normalmente a produtividade florestal é definida em termos de qualidade de sítio, esta é tida como a produção máxima de determinada área em um dado período de tempo (DANIEL; HELMS; BAKER, 1979).

De acordo com Pritchett (1990), uma vez que o clima seja adequado, as características do solo são as que mais influenciam a produtividade florestal, entre elas destacam-se: a profundidade do solo, textura, estrutura, temperatura, pH, fertilidade, umidade e aqueles relacionados ao material de origem. Segundo Daniel, Helms e Baker (1979), a textura, profundidade e localização topográfica são atributos físicos que não podem ser modificados, exceto por meio da erosão. Já a estrutura, porosidade e conteúdo de matéria orgânica podem ser modificados através de práticas silviculturais. A diferença na produção de biomassa em madeira, de um povoamento para outro pode ser resultado tanto dos padrões de alocação, quanto da disponibilidade de recursos, assim como de uma maior captura ou maior eficiência para produção dos recursos disponíveis (BINKLEY; STAPE; RYAN, 2004).

De acordo com Binkley, O'connel e Sankaran (1997), a produtividade dos povoamentos florestais possui um alto dinamismo, variando de acordo com a idade, densidade de plantio, fertilidade do solo e a espécie plantada. Entretanto, segundo Gholz e Lima (1997), a produtividade dos povoamentos é um fator altamente variável, pois o êxito no desenvolvimento das plantações geralmente ocorre quando existe uma ampla informação sobre as condições ambientais do local e uma acurada seleção das espécies a serem plantadas, buscando entender como os fatores ambientais interagem com a fisiologia das espécies para obter os ganhos desejados na produção.

De maneira geral, a produtividade florestal é influenciada pela profundidade, textura, estrutura, fertilidade, temperatura, pH, umidade e material de origem do solo (PRITCHETT, 1990).

3.2.1 Fatores ambientais que influenciam a produtividade florestal

Segundo Carmo, Resende e Silva (1990), o clima, fisiografia e solos são os fatores do meio físico que mais afetam a capacidade produtiva de uma floresta em um determinado local. Portanto, a produtividade e o crescimento são dependentes da interação de fatores biofísicos e abióticos do meio ambiente. Várias alternativas para efetuar a classificação da produtividade dos locais foram estudadas, as quais correlacionam fatores edáficos, climáticos, fisiográficos, a vegetação rasteira, registros históricos e elementos dendrométricos tais como área basal e altura (CUNHA NETO et al., 1996). Em locais onde a radiação e a temperatura geralmente não são limitantes, como é o caso do Brasil, a sustentabilidade da produção é primariamente dependente da manutenção dos fluxos de água e nutrientes em níveis adequados à satisfação das respectivas demandas pelas árvores (POGGIANI; SCHUMACHER, 2000).

Os levantamentos de solos constituem as mais detalhadas estratificações do ambiente, pois consideram os nutrientes que interessam às plantas (RESENDE; LANI; REZENDE, 2002). A qualidade do solo é o fator mais importante entre o sistema de produção e a sustentabilidade das atividades florestais e agrícolas, e deve ser composta de suas propriedades físicas, físico-hídricas, químicas e biológicas (GONÇALVES; DEMATTÊ; COUTO, 1990), possibilitando o desenvolvimento das plantas, regulando a distribuição de água no solo, funcionando como um tampão ambiental na formação, atenuação e degradação de compostos danosos ao meio ambiente. No entanto, há poucos levantamentos pedológicos detalhados que correlacionam as características dos solos com o crescimento de espécies florestais.

Carvalho et al. (1999), estudando a influência das características do solo no crescimento de *Pinus taeda* por meio de técnicas estatísticas multivariadas, concluíram que o teor de argila do solo foi determinante para estabelecer as classes de sítio para o povoamento em questão. Para Rachwal et al. (2007), solos pedregosos, pouco profundos, com baixa saturação de bases e alta concentração de alumínio não são recomendáveis para o cultivo da acácia-negra.

Diversos autores vêm demonstrando que as características do solo como teor de argila nos horizontes A e B, profundidade efetiva, níveis de nutrientes, teor de matéria orgânica e capacidade de retenção de umidade afetam a qualidade do

sítio. Dentre todos os fatores ambientais capazes de influenciar a produtividade florestal, o presente trabalho estudou a relação do potencial produtivo florestal com a altitude, profundidade efetiva do solo, granulometria e a química, ou fertilidade do solo.

3.2.1.1 Altitude

De acordo com Schober (1949) citado por Assmann (1970), plantios localizados em maiores altitudes tendem a iniciar seu crescimento mais tardiamente no ano vegetativo e apresentar maior duração do período de crescimento ao longo do ano. Ferreira e Couto (1981) concluíram que a altitude do local de plantio foi a variável ambiental que mais influenciou o crescimento das espécies *Eucalyptus camaldulensis*, *E. dunni*, *E. grandis*, *E. pellita* e *E. tereticornis* em plantios comerciais localizados em Minas Gerais e Espírito Santo. Grey et al. (1979), estudando a produtividade de *Pinus patula* na África do Sul, concluíram que a altitude foi o fator mais importante na explicação do crescimento das plantas. Entre os fatores testados estavam incluídas características climáticas e edáficas (profundidade efetiva, fertilidade e colocação, entre outras).

3.2.1.2 Profundidade efetiva do solo

A profundidade efetiva do solo é uma propriedade quantitativa que influencia a quantidade de recursos disponíveis para as plantas por unidade de área (DIAS; FERREIRA; GONÇALVES, 2008). Segundo o mesmo autor, a profundidade do solo assim como a textura, que variam pouco ao longo do tempo, são úteis para comparar a qualidade do solo entre tipos de solos e num mesmo tipo de solo antes e depois de ter sido aplicada qualquer prática de gestão. De acordo com Louw e Scholes (2006), a profundidade efetiva do solo, juntamente com a posição topográfica e o material originário do solo são indicadores de confiança do estado de umidade do solo.

De acordo com Copeland (1958) e Zahner (1958), a profundidade do solo tem grande influência no suprimento de água e no livre crescimento do sistema radicular. Normalmente, o potencial de crescimento da floresta apresenta uma

relação direta com a profundidade efetiva do solo, notoriamente nas áreas em que os solos apresentam balanços hídricos com elevadas deficiências hídricas. Quando a profundidade efetiva do solo varia, devido à presença de camadas de impedimento físico, como o horizonte plântico, fragipan, duripan, ou outros horizontes de baixa permeabilidade para as raízes, o padrão de crescimento das árvores pode ser razoavelmente predito (COPELAND, 1958; ZAHNER, 1958).

A profundidade efetiva do solo é indicada por diversos autores como fator decisivo para determinar boas produtividades (SHERRY, 1971; DONKIN, 1994; RACHWAL et al., 2007). A pequena profundidade efetiva dos solos constitui-se em uma séria limitação ao desenvolvimento das plantas, devido ao reduzido volume de solo a ser explorado pelas mesmas, para sustentação e assimilação de água e nutrientes (OLIVEIRA, 2001). Schönau e Aldworth (1991), na África do Sul, encontraram maior altura dominante para acácia-negra em solos com maior profundidade efetiva.

Doldan (1989) encontrou forte correlação do crescimento em altura de *Pinus taeda* com a profundidade efetiva do solo, considerando esta variável como uma das mais limitantes para o crescimento dessa espécie no Segundo Planalto Paranaense. Schönau (1969) encontrou correlação positiva entre a produção de madeira de acácia-negra e profundidade do solo. O mesmo foi encontrado por Donkin (1994), o autor observou que, na tentativa de estabelecer o potencial produtivo dos sítios para acácia-negra, a profundidade efetiva do solo foi claramente a variável mais importante no crescimento da espécie. Não é apenas a profundidade em si que permite um bom desenvolvimento das árvores de um ponto de vista fisiológico, mas as complexas interações e associações com a umidade do solo, clima e material de origem do solo.

3.2.1.3 Granulometria do solo

A textura do solo é a propriedade física qualitativa do solo que controla a troca, retenção e absorção de água, nutrientes e oxigênio (DIAS; FERREIRA; GONÇALVES, 2008). A textura do solo, além de apresentar estreita relação com o suprimento de água e nutrientes do solo, tem grandes implicações na manifestação da fertilidade do solo, uma vez que as reações de troca entre o sistema radicular e o

complexo coloidal do solo são de maior intensidade sob boa disponibilidade de água (GONÇALVES, 1988).

A estrutura do solo, a consistência, a capacidade de retenção de água, a drenagem e as reações de troca entre o sistema radicular e o complexo coloidal são diretamente dependentes da textura (CARVALHO et al., 1999). Segundo o mesmo autor, esta pode ser considerada, individualmente, como a característica que mais determina a capacidade produtiva dos sítios florestais. Carvalho et al. (1999) chegaram à conclusão de que em solos de textura mais argilosa, independentemente da classe a que pertencem, propiciam maior crescimento do *Pinus taeda*, na região de Arapoti, PR.

As frações texturais silte e argila apresentam papéis fundamentais na capacidade de retenção de umidade e nutrientes, particularmente nos solos de textura arenosa (BARNES; RALSTON, 1955; GONÇALVES, 1988). No entanto, quando os teores dessas frações se elevam consideravelmente, é verificado comportamento inverso com relação ao crescimento das árvores, comprometendo o sistema de aeração da atmosfera edáfica (RALSTON, 1964).

Segundo estudos desenvolvidos por Petersen et al. (1967), demonstraram que a disponibilidade de água é mínima em solos de textura arenosa, máxima nos solos de textura média com altos teores de silte e intermediária nos de textura mais fina. Solos argilosos costumam ser mais férteis que os arenosos, embora possam apresentar drenagem insuficiente (ZOBEL; WYK; STAHL, 1987). De acordo com Strothmann (1960), moderadas quantidades de fragmentos grosseiros podem favorecer a penetração profunda de chuvas brandas, reduzindo as perdas por evaporação. No entanto, grandes reduções no volume efetivo de solo, devidas ao aumento das quantidades de cascalho e pedregulho, decrescem a capacidade de retenção e armazenamento de umidade do solo.

De acordo com Ralston (1967), o crescimento das árvores se eleva com o aumento do teor de silte e argila, devido a um suprimento mais favorável de água e nutrientes, até um ponto em que o acréscimo de partículas finas compromete a aeração do solo e, conseqüentemente, admite-se que o potencial de crescimento das florestas apresenta uma resposta curvilínea relativamente ao acréscimo dos teores de silte e argila em áreas com solos bem drenados, mas com amplas variações texturais.

Haig (1929) estudou as relações existentes entre o índice de sítio encontrado em plantações de *Pinus resinosa* com as características texturais de vários horizontes do solo. Num outro estudo, Stoecheler (1948) citado por Haig (1929), observou que, em povoamentos de *Populus tremuloides* com idades entre 20 e 60 anos, a produtividade aumentava com o aumento do conteúdo de argila e silte, até um nível ótimo de 50 a 55% dessas frações texturais.

3.2.1.4 Fertilidade do solo

As florestas plantadas no Brasil são conduzidas, em sua grande maioria, em solos de baixa fertilidade. Os povoamentos florestais geralmente, por apresentarem altas taxas de crescimento, necessitam de quantidades significativas de água e nutrientes do solo, o que causa preocupações com a sustentabilidade desses sistemas e com a necessidade de reposição futura de nutrientes (ANDRADE et al., 2003). À medida que a raiz cresce no solo, ela absorve os nutrientes que inicialmente se encontram no trajeto de seu crescimento. Com o tempo, há o decréscimo da concentração dos nutrientes perto da superfície das raízes, à medida que eles são absorvidos, criando-se uma gradiente de concentração entre a região mais próxima e aquela mais distante da raiz. O transporte do novo suprimento de nutrientes até a superfície de absorção é feito pela água, que é considerada o veículo do processo (NOVAIS; BARROS; NEVES, 1990).

Segundo Louw e Scholes (2006), as relações dos nutrientes e da água têm uma influência significativa na produtividade florestal. Para Gonçalves, Demattê e Couto (1990), o pH, teor de matéria orgânica, teor de fósforo disponível, nitrogênio total, teor de potássio, cálcio e magnésio trocável, em ordem decrescente de frequência, são as propriedades químicas do solo que mostram as melhores correlações com o crescimento da maioria das espécies. Segundo esse mesmo autor, diversos resultados experimentais com fertilizantes têm mostrado elevações da produtividade florestal, em virtude de alterações dos níveis dos nutrientes no solo, o que sugere que as propriedades químicas devem ser úteis em estudos de relação solo-sítio.

De acordo com Pritchett (1990), a absorção de nutrientes é influenciada pelo tipo e idade das árvores, bem como pelas condições edafoclimáticas do ambiente.

Os fatores que mais influem na quantidade de nutrientes absorvidos num determinado tempo por uma árvore são a necessidade total de nutrientes, velocidade de crescimento, eficiência de uso dos nutrientes nos processos metabólicos e capacidade de absorção de nutrientes dos solos. As árvores acumulam nutrientes e a quantidade acumulada por uma espécie relaciona-se diretamente com a produção florestal (PRITCHETT, 1990). Segundo O'Connell e Sankaran (1997), as florestas dependem da ciclagem de nutrientes para atender os requerimentos nutricionais para o crescimento, sendo a produção e decomposição de serapilheira a principal via de ciclagem biogeoquímica para a maioria dos elementos.

Segundo Gonçalves et al. (2000), a quantidade total de nutrientes em cada compartimento das árvores está relacionada a quantidade de biomassa acumulada e do teor de nutrientes nos diversos tecidos e órgãos da planta. Os teores de nutrientes são maiores em compartimentos metabolicamente mais ativos das plantas (folhas, brotações e tecidos corticais), e os menores teores são observados na madeira, casca e galhos mortos. Apesar disso, é na madeira que se concentram os maiores conteúdos de nutrientes, devido à sua maior biomassa.

A fertilidade do solo, juntamente com a umidade, influencia a acumulação de biomassa vegetal (KRAMER; KOZLOWSKI, 1979), em que a quantidade de matéria orgânica no solo é um fator relevante para a sustentabilidade de sítio (NAMBIAR; BROWN, 1997). Mochiutti (2007) encontrou correlação positiva entre a altura da acácia-negra e os teores de matéria orgânica e potássio no horizonte superficial do solo. Já Dedeczek et al. (2007), perceberam que a acácia-negra responde melhor à fertilidade do solo do que à profundidade efetiva do solo. Schönaue (1969) encontrou correlação positiva entre a produção de madeira de acácia-negra e a reserva de nutrientes do solo.

Apesar da grande importância da fertilidade do solo para o crescimento das árvores, este fator é de difícil diagnóstico em solos para uso florestal, devido ao grande número de variáveis inter-correlacionadas que podem interferir nessa propriedade (GONÇALVES, 1988).

3.3 ÍNDICE DE SÍTIO

É de suma importância para o manejo e planejamento florestal estimar a capacidade produtiva do sítio. A expressão sítio é utilizada para designar uma unidade de área indivisível em termos de produtividade florestal, reflexo da interação de todas as variáveis biológicas e ambientais que afetam o crescimento (GONÇALVES, 1988). Com a classificação e mapeamento dos sítios, têm-se condições de otimizar o planejamento e a execução das atividades florestais, melhorar o preparo das áreas de plantio, reduzindo os impactos sobre o meio ambiente. Segundo Scolforo (1998), a classificação de sítios florestais é de ampla importância, podendo ser a base da estratificação dos povoamentos florestais, tanto para fins de inventário como para fins de exploração, ainda clarificando as possibilidades e riscos para o manejo das florestas.

É necessário destacar que um determinado local pode ter uma boa qualidade de sítio para uma espécie, no entanto, pode apresentar uma qualidade de sítio ruim para outra (CLUTTER et al., 1993; TONINI et al., 2001). De acordo com Spurr (1952), a qualidade absoluta do sítio é teoricamente medida pela quantidade de madeira produzida. Entretanto, essa produção também é condicionada por fatores genéticos (espécie, procedência, variabilidade), idade de rotação e densidade do povoamento. Porém, esse critério só poderia ser utilizado como medida da capacidade produtiva do sítio quando esses outros fatores fossem constantes, o que é impraticável.

Considerando a necessidade de se obter um modelo para prognose do volume dos povoamentos ao longo do tempo, a classificação da capacidade produtiva por meio de índices locais é uma ferramenta essencial. A construção dos regimes de manejo é feita a partir de estimativas do volume em função da idade, área basal e Índice de Sítio. Assim, grande parte das decisões tomadas, no meio florestal, dependem de atividades como o mapeamento das unidades de produção, por meio de Índices de Sítio. No Brasil, são poucos os estudos relacionados, e apenas algumas empresas possuem suas áreas mapeadas, em termos de capacidade de produção.

A capacidade produtiva de um sítio florestal pode ser avaliada através da medição de fatores intrínsecos (altura, crescimento e produção final) ou extrínsecos (clima, litologia, edafologia e morfologia) à biomassa florestal (ORTEGA;

MONTEIRO, 1988). Para Tobar (1976), o volume é o parâmetro mais apropriado para avaliar a capacidade produtiva de uma área para produzir madeira, portanto, o mais indicado para avaliar a qualidade de sítio. No entanto, há algumas limitações quanto ao uso do volume, pois o volume é muito influenciado pela idade, espécie, densidade, tratamentos silviculturais, fatores genéticos. Diante disso, prefere-se a utilização da altura e, em geral, consideram o parâmetro mais adequado para este fim (MACHADO, 1978). Geralmente, o Índice de Sítio é determinado por meio da altura dominante (HDOM) em função do tempo (t) em uma determinada idade de referência (TORRES; VALLE; RESTREPO, 2012).

Diversos trabalhos têm sido realizados relacionando o crescimento de diferentes espécies com os fatores de sítio utilizando técnicas como análise de regressão, análises de correlação e estatística multivariada (BOGNOLA, 2007). O procedimento mais eficiente é a classificação multifatorial, pois possibilita interpretar um conjunto de fatores ao mesmo tempo e identificar quais fatores explicam a produtividade e quais são os limitantes para determinada espécie (SCOLFORO, 1998). Segundo esse mesmo autor, embora não seja muito utilizada pelos pesquisadores devido à sua complexidade, a classificação multifatorial de sítio é o procedimento de classificação da produtividade mais eficiente. Nessa técnica, é possível interpretar um grande conjunto de variáveis ao mesmo tempo por meio do uso da estatística multivariada. Desse modo, é possível identificar se profundidade do solo, altitude, granulometria do solo, macro e micronutrientes, dentre outros, explicam com a mesma intensidade a qualidade do sítio. Identificados os fatores que melhor explicam a produtividade e os fatores limitantes do sítio para determinada espécie, pode-se então promover a classificação do mesmo.

3.4 UNIDADES DE MANEJO

A necessidade de se considerar a variabilidade espacial existente em uma área de produção florestal é importante para a redução nas quantidades de insumos a serem aplicados, assim diminuindo custos de produção e também os impactos ambientais. Diante disso, surge o termo Agricultura de Precisão como método de manejo das culturas que objetiva dar tratamento diferenciado em áreas dentro de um mesmo talhão, considerando o potencial produtivo das culturas nessas áreas, ou

seja, agricultura de precisão surge como ferramenta que auxilia na tomada de decisão frente à variabilidade espacial existente.

Segundo Khakural, Robert e Huggins (1998), a análise da variabilidade regionalizada do solo tem sido explorada como um dos recursos na definição de Unidades de Manejo. Nesse mesmo sentido, Lark et al. (1998) consideraram que a análise de mapas de produtividade é uma forma de definir Unidades de Manejo em um talhão, associando-as às características do solo.

Muitos pesquisadores consentem que o mapa de produtividade florestal é a informação mais completa para se visualizar a variabilidade espacial das florestas. Bognola (2007) estudou a variabilidade espacial da produtividade de *Pinus taeda* em função das variáveis ambientais visando o estabelecimento de Unidades de Manejo, a variabilidade encontrada foi apresentada em um mapa com 3 classes de produtividade potencial. No entanto, o mapa de produtividade é apenas uma etapa de todo o processo que envolve a agricultura de precisão e representa o efeito combinado de diversas fontes de variabilidade espacial e temporal. Uma parte dessa variabilidade pode ser atribuída a fatores que são constantes ou variam lentamente, enquanto outros fatores são transitórios, mudando em sua importância e distribuição espacial e temporal de uma colheita para outra (CAPELLI, 2004).

Ao interpretar um mapa de produção com a finalidade de futuro gerenciamento localizado do campo, deve-se levar em consideração, as causas consistentes de variabilidade, já que para as que não persistem no tempo pode-se ter pouco ou nenhum controle (QUEIROZ et al., 2000).

3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS MULTIVARIADAS

Quando se necessita analisar a relação entre vários atributos de forma simultânea lança-se mão da análise estatística multivariada, pois os métodos univariados apresentam limitações, já que a característica estudada é interpretada isoladamente, não considerando a correlação com os demais atributos da análise de dados (GELSOMINO et al., 2006; MARIANI; CHANG; KABZEMS, 2006). Portanto, a estatística multivariada consiste em um conjunto de métodos estatísticos utilizados em situações nas quais variáveis são medidas simultaneamente, em cada elemento amostral (MINGOTI, 2005), proporcionando a integração das múltiplas informações

extraídas das avaliações amostrais. Geralmente, as variáveis são correlacionadas entre si e quanto maior o número de variáveis, mais complexo torna-se a análise por métodos de estatística univariada.

De acordo com Lattin, Carrol e Green (2011), os métodos multivariados podem ser definidos como um conjunto de procedimentos para analisar a associação entre dois ou mais conjuntos de medidas que foram feitas em cada objetivo em uma ou mais amostras. Caso apenas dois conjuntos de medidas estejam envolvidos, os dados são referidos como bivariados.

Segundo Mingoti (2005), a estatística multivariada permite que se faça uma redução na dimensão de análises com múltiplas respostas com o objetivo de simplificar o seu entendimento, a sua visualização e interpretação, e ainda obter detalhes suficientes para uma adequada representação dos resultados. Ainda, segundo a mesma autora, a análise multivariada é uma análise exploratória de dados e seu uso é justificado quando os objetivos da investigação são a redução ou simplificação estrutural dos dados, agrupamento e classificação de objetos, investigação da dependência entre as variáveis, predição e construção de testes de hipóteses. Para Tinsley e Brown (2000), sob ponto de vista prático, são técnicas desenvolvidas para revelar ou relevar características associativas e informações contidas em conjuntos complexos de dados, suprimindo detalhes menos importantes.

A análise das interrelações entre solo-floresta por meio de análises estatísticas univariadas, de modo geral, comprometem as interpretações, pois na estatística univariada a existência de dependência entre as variáveis não é analisada. A interação desses atributos pode ser estudada pelos métodos estatísticos multivariados, que permitem o agrupamento das populações com características similares e permitem a obtenção de um melhor entendimento do fenômeno estudado (BARRETO, 2015). Ademais, fenômenos do ambiente propendem a apresentar multicolinearidade entre as variáveis. Ao passo que a multicolinearidade aumenta, fica mais complicada a interpretação da variável estatística, uma vez que se torna mais difícil verificar o efeito de qualquer variável, devido as suas inter-relações (HAIR et al., 2005). Sem embargo, uma alternativa para a resolução dessa problemática é o emprego de técnicas de análise estatística multivariada.

Na ciência do solo, diversos autores vêm utilizando as técnicas multivariadas para a classificação dos solos, por meio da análise de agrupamento (NANNI; DEMATTÊ; FIORIO, 2004; GAMA-RODRIGUES; BARROS; GAMA-RODRIGUES, 2005). Os objetivos dessa técnica é organizar membros de uma grande população em grupos ou classes de indivíduos em que a natureza e as relações entre eles possam ser mais bem entendidas.

As técnicas estatísticas multivariadas dividem-se, basicamente, em dois grupos: as técnicas exploratórias de simplificação ou sintetização da estrutura de variabilidade de dados, como por exemplo a análise de componentes principais, análise fatorial, análise de correlações canônicas, análise de agrupamento (cluster), análise discriminante e análise de correspondência; e técnicas de inferência estatística, como por exemplo os métodos de estimação de parâmetros, testes de hipóteses, análise de variância, de covariância e análise de regressão (MINGOTI, 2005). Uma vantagem de se aplicar as técnicas multivariadas exploratórias é que, na sua maioria, independem do conhecimento da forma matemática da distribuição de probabilidades geradora dos dados amostrais.

3.5.1 Análise de Trilha (*Path analysis*)

O conhecimento do grau de relação linear entre variáveis quantitativas através dos coeficientes de correlação, tal como estimado pelo coeficiente de correlação de Pearson, têm sido de grande importância durante análise de correlação entre as variáveis de um modelo de regressão. No entanto, não dão a devida importância aos efeitos diretos e indiretos das variáveis independentes (variáveis explicativas) sobre a variável dependente. Estudos sobre a decomposição do coeficiente de correlação pode ser realizado através da análise de trilha (*path analysis*), desenvolvida e detalhada por Wright (1921 e 1923) e descrita por Li (1975).

A análise de trilha é um artifício que o pesquisador dispõe para entender as causas envolvidas nas associações entre variáveis e decompor a correlação existente em efeitos diretos e indiretos, através de uma variável principal – como dados de produção florestal – e as variáveis independentes, ou seja, as variáveis de posicionamento, variáveis granulométricas e químicas do solo. De acordo com

Schuster (1996), a análise de trilha reside basicamente na formulação do relacionamento causa-efeito entre as variáveis. Além disso, o desdobramento de correlações é dependente do conjunto de características estudadas, que normalmente é estabelecido pelo conhecimento prévio do pesquisador de sua importância e de possíveis inter-relações expressas em “diagramas de trilhas” (CRUZ; REGAZZI, 1994).

Na medição dos efeitos diretos e indiretos de um conjunto de variáveis independentes sobre uma variável básica, faz-se necessário estimar os coeficientes de trilha, obtidos por meio de equação de regressão em que as variáveis são previamente padronizadas. De modo contextualizado, um coeficiente de trilha ou análise de causa e efeito pode ser definido como um coeficiente de regressão estandardizado ou padronizado, sendo que a análise de trilha é composta por uma expansão da regressão múltipla quando estão envolvidas inter-relações complexas (CRUZ; CARNEIRO, 2003). A estimativa destes coeficientes, todavia, pode ser adversamente afetada pelos efeitos de multicolinearidade entre as variáveis envolvidas (CARVALHO et al., 1999). Em presença de multicolinearidade, as variáveis associadas aos estimadores dos coeficientes de trilha podem atingir valores demasiadamente elevados, tornando-os pouco confiáveis. Para contornar os efeitos da multicolinearidade, é necessário identificar quais variáveis estão inflacionando o grau de multicolinearidade, outra possibilidade é empregar uma metodologia alternativa ao dos quadrados mínimos, proposto por Carvalho (1995) e denominada de análise de trilha em crista, para estimação dos parâmetros.

3.5.2 Análise de Componentes Principais (ACP)

Também conhecida como PCA (*Principal Component Analysis*), o método da análise de componentes principais foi criado por Karl Pearson em 1901, e fundamentada por Hotelling (1933, 1936). Seu objetivo principal é explicar a estrutura da variância e de covariância de um vetor aleatório, composto por p -variáveis aleatórias, por meio da construção de combinações lineares das variáveis originais (MINGOTI, 2005). A análise de componentes principais é uma ferramenta utilizada para reduzir a dimensão dos dados multivariados, isto é, a informação apresentada nas p -variáveis originais é sucedida pela informação contida em k ($k < p$)

componentes principais, além disso, ela é útil para análise da estrutura de sistemas multidimensionais e para processos descritivos (AHRENS; HOLBERT, 1981). Essa técnica permite a organização dos dados, por meio de combinações lineares das variáveis originais, para que as primeiras poucas variáveis novas resultantes (componentes principais) respondam por tantas informações disponíveis quanto possível (LATTIN; CARROL; GREEN 2011). Além disso, essa técnica elimina a multicolinearidade, fazendo com que cada componente não esteja correlacionado com todos os outros.

A suposição de normalidade não é requisito necessário para que a técnica de componentes principais seja utilizada. Primeiramente, deve-se calcular a matriz de variância-covariância, ou então a matriz de correlação (R), encontrar os autovalores e autovetores e, finalmente, obter as combinações lineares, que por sua vez serão as novas variáveis, denominadas de componentes principais (REGAZZI, 2001). Posteriormente, faz-se um ranqueamento para decidir qual o número total de componentes principais que melhor representarão o conjunto de variáveis originais. O ranqueamento segue o critério estabelecido por Kaiser (1960), em que são incluídos apenas os componentes cujos autovalores sejam iguais ou superiores a 1. Geralmente, utilizam-se os componentes que conseguem sintetizar uma variância acumulada em torno de 70%.

Caso seja realizada alguma transformação das variáveis originais, como a padronização das variáveis, os componentes principais deverão ser determinados utilizando a matriz de covariâncias relativo ao vetor transformado. Nesse caso, os componentes principais são determinados a partir da matriz de covariâncias das variáveis originais padronizadas, o que é semelhante a extrair-se os componentes principais utilizando a matriz de correlação das variáveis originais.

Alguns estudos já foram realizados utilizando a técnica de componentes principais na avaliação de atributos do solo ou na avaliação de variáveis ambientais. A exemplo o estudo desenvolvido por Valladares (2008), que aplicou a análise de componentes principais no agrupamento de perfis de solos, com base em características físicas, químicas, morfológicas e do ambiente de ocorrência. Outros estudos foram desenvolvidos analisando os componentes principais de atributos do solo (GOMES et al. 2003; MOÇO et al., 2005; GUEDES et al., 2006; RODRIGUES, et al., 2007; CHERUBIN et al., 2011; HIGUCHI et al., 2012; SANTI, et al., 2012, etc).

3.5.3 Análise de Agrupamento (*Cluster*)

A análise de agrupamento, conhecida também como análise *cluster*, tem como objetivo fracionar os elementos da amostra, ou da população, em grupos de tal modo que os elementos relacionados a um mesmo grupo sejam similares entre si com respeito às variáveis que neles foram medidas, e os elementos em grupos diferentes sejam heterogêneos (MINGOTI, 2005). Para decidir se dois elementos do conjunto de dados são semelhantes é necessário considerar medidas que descrevam a similaridade entre elementos amostrais de acordo com as características que neles foram medidas. As medidas de similaridade baseiam-se no conceito, essencialmente, na obtenção de grupos em que as variações ou distâncias entre os objetos, em um mesmo grupo, sejam mínimas e entre os objetos, em distintos grupos, sejam máximas (KACHIGAN, 1988; JOHNSON; WICHERN, 1998).

Na análise de agrupamento é possível utilizar todas as n observações amostrais, mesmo informações que estejam incompletas. Os elementos amostrais podem ser comparados de modo ponderado, nas variáveis para as quais existem informações completas (GOWER, 1971). Assim como a análise de componentes principais e análise fatorial, a análise de agrupamento também é útil quando se deseja reduzir a dimensionalidade da amostra ou o número de variáveis a serem avaliadas. Portanto, além da classificação, a análise de agrupamento possibilita dividir os elementos amostrais em k grupos internamente homogêneos e heterogêneos entre si (MINGOTI, 2005).

De acordo com Barroso e Artes (2003), as técnicas de agrupamento ou *clusters* são frequentemente classificadas em dois tipos: técnicas hierárquicas e não hierárquicas, sendo que as hierárquicas são classificadas em aglomerativas e divisivas. As técnicas hierárquicas, na maioria das vezes, são utilizadas em análises exploratórias dos dados com o intuito de identificar possíveis agrupamentos e o valor provável do número de grupos. Já para o uso de técnicas não hierárquicas, é necessário que o valor do número de grupos já esteja pré-estabelecido pelo pesquisador.

3.5.4 Análise Discriminante

A análise discriminante é uma técnica utilizada para a classificação de elementos de uma amostra ou população, e para a sua utilização, é necessário que os grupos para os quais cada elemento amostral pode ser classificado sejam pré-definidos (MINGOTI, 2005). Após isso, a função matemática conhecida como discriminação ou classificação é utilizada para classificar novos elementos amostrais nos grupos já existentes.

A comparação do elemento amostral em relação aos potenciais grupos é realizada por meio da construção de uma regra matemática de classificação fundamentada na teoria das probabilidades. Para cada novo elemento amostral, a regra de classificação permite decidir qual é a população mais provável de ter gerado seus valores numéricos nas n características avaliadas (MINGOTI, 2005). A qualidade da função discriminante não depende somente da identificação correta do elemento amostral, mas também das variáveis escolhidas para a sua elaboração. Diante disso, é necessário que se tenha medido, nos elementos amostrais, variáveis que possam realmente diferenciar as populações, do contrário a qualidade de ajuste estará comprometida. De acordo com Montgomery, Peck e Vining (2001), os métodos de seleção de variáveis como os utilizados em análise de regressão podem ser utilizados para a escolha das variáveis-resposta mais importantes para a discriminação. São eles: a escolha pela análise de variância univariada, método *Forward*, Método *Backward* e Método *Stepwise*.

3.6 GEOESTATÍSTICA

3.6.1 Conceito e aplicação

O objetivo da análise espacial é mensurar aspectos diversos considerando a localização espacial do fenômeno em estudo, isto é, a análise espacial possibilita estudar, explorar e modelar fenômenos geográficos por meio de Sistemas de Informação Geográficas (SIG) (DRUCK et al., 2004). Nesse cenário, a estatística clássica vem sendo substituída pela análise geoestatística, pois na estatística clássica, as amostras são independentes, isto é, as amostras não têm igual

probabilidade de ocorrência. Já a geoestatística está fundamentada na hipótese de dependência espacial (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989), ou seja, as amostras são dependentes da posição espacial, portanto não têm igual probabilidade de ocorrência. Desse modo, as principais razões para justificar a utilização de técnicas geoestatísticas estão na obtenção do padrão da continuidade espacial do fenômeno estudado.

A geoestatística é apoiada no estudo de uma função espacial numérica que varia de um local para outro com continuidade e cujos valores são relacionados com a localização que ocupam (FARACO et al., 2008). A geoestatística também possibilita a estimativa de uma determinada variável em locais não amostrados e a aplicação em mapeamentos, planejamentos de amostragens e modelagens espaciais (CAMBARDELLA et al., 1994; GOMES et al., 2007).

Os métodos geoestatísticos estão fundamentados na Teoria das Variáveis Regionalizadas, desenvolvida por Daniel G. Krige e formalizada por Matheron, em que a variância espacial dos dados depende da distância entre amostragens (LOURENÇO; LANDIM, 2005). De acordo com Matheron (1971), a teoria das variáveis regionalizadas permite a aplicação da geoestatística para dois propósitos diferentes: o teórico, para descrever as propriedades da estrutura espacial de um fenômeno regionalizado; e o prático, para estimativa de uma variável regionalizada com base em dados de uma amostragem.

De acordo com Bubenicek e Haas (1969), citado por Bognola (2007), as características qualitativas de variáveis regionalizadas são: localização (os valores de uma variável regionalizada são dependentes de suas funções espaciais relativas dentro do campo geométrico, estes valores são dependentes do tamanho da amostra, forma e orientação), suporte (por vezes a variável regionalizada não está definida num ponto, mas sobre uma área ou volume centrado em x , portanto, à unidade amostral básica sobre a qual a variável é medida chama-se suporte), continuidade (a variação espacial de uma variável regionalizada pode ser, dependendo do fenômeno, grande ou pequena, mas deve existir certa continuidade ponto a ponto), anisotropia (a regionalização pode apresentar anisotropias quando apresentam variações graduais numa direção e rápida ou irregular em outra) e, fenômenos de transição (no campo da variável, em formações sedimentares, as estruturas são frequentemente encontradas consistindo de lentes superpostas. Estas estruturas formam uma rede de descontinuidades nas bordas das lentes, que

é caracterizada como fenômeno de transição). Portanto, uma variável regionalizada é uma função numérica com distribuição espacial, essa função numérica varia de um ponto a outro com continuidade aparente, porém as variações podem não ser representadas por uma função matemática simples.

Segundo Bagnara, Prietto e Timbola (2012), a modelagem geoestatística abrange três etapas: i) análise variográfica, com o objetivo de descrever a estrutura de dependência espacial do fenômeno em estudo; ii) análise inferencial (krigagem), com o objetivo de interpolar os valores de uma variável espacial em locais não amostrados e, iii) simulação estocástica, com o objetivo de construir cenários equiprováveis do fenômeno espacial em estudo.

Considerando que os fenômenos naturais não podem ser tratados como fenômenos aleatórios, torna-se necessário a utilização de ferramentas matemáticas que permitam estudar os aspectos aleatório e espacial de forma simultânea. Embora a utilização da análise geoestatística esteja bastante difundida em vários ramos da ciência, para Dormann (2007) 80% das publicações na literatura ecológica não consideram a estrutura espacial de dependência espacial.

Outrora, a estatística clássica era a ferramenta utilizada para o estudo das variáveis do solo, a qual requeria um número alto de unidades amostrais para estimar o parâmetro com precisão. A preocupação em conhecer e estimar o tipo e a magnitude de variação espacial das variáveis do solo foi iniciada por Nielsen, Biggar e Erh (1973). Posteriormente, outros autores como McBratney e Webster (1983), Vieira et al. (1983) e Souza, Cogo e Vieira (1997), comprovaram que o estudo da dependência espacial das propriedades do solo por meio da geoestatística, pode reduzir o número de unidades amostrais necessárias para a estimação do parâmetro com precisão. A partir de então, a variabilidade espacial dos atributos do solo tem tido especial atenção por diversos pesquisadores, destacando a geoestatística como importante ferramenta na análise e caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo. Inúmeros estudos têm demonstrado que a variabilidade das propriedades do solo é espacialmente dependente (KRIGE, 1966; MATHERON, 1971; TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985; WEBSTER, 1985; COUTO; KLAMT, 1999; VIEIRA et al., 2002; MELLO; OLIVEIRA; BATISTA, 2006).

O desejável tanto para estudos do solo quanto para o manejo florestal é obter informações com precisão e de baixa onerosidade (redução de trabalhos de campo). No entanto, geralmente os métodos usados para análise de inventários

florestais não exploram suficientemente as relações que possam existir entre as unidades amostrais. Já os métodos geoestatísticos podem avaliar melhor as estruturas de dependência espacial entre as características dendrométricas de uma espécie e as variáveis do seu meio físico, de forma a obter resultados que sejam capazes de explorar adequadamente as relações espaciais existentes entre os dados (MELLO, 2004; BOGNOLA, 2007). Segundo Manzione (2002), para uma análise mais extensiva da dependência espacial das variáveis do solo, deve-se fazer uso da geoestatística multivariada, sendo necessário que sejam observadas algumas características multivariadas que envolvam as variáveis.

Ainda que a geoestatística seja bastante aplicada na ciência do solo e geologia, há muitos estudos na área florestal, os quais aplicam essa ferramenta com o objetivo de explorar aspectos dendrométricos de espécies para plantio, na estimativa de índices de sítio, na estimativa do volume total de madeira (HÖCK; PAYN; SHIRLEY, 1998; GUNNARSON et al., 1998; BOGNOLA, 2007; MELLO; OLIVEIRA; BATISTA, 2006; MELLO, et al., 2009; PEREIRA et al., 2011, PELISSARI, 2015), entre outras aplicações, sobretudo no manejo florestal.

3.6.2 Semivariograma

O semivariograma é uma técnica geoestatística utilizada para estimar a variabilidade espacial. Essa ferramenta avalia a dependência espacial de uma característica em função da distância entre pontos amostrados, utilizando para isso uma função numérica denominada semivariância. O semivariograma considera as coordenadas geográficas dos pontos amostrados, dessa forma, quanto mais próximos estão dois pontos, menor a probabilidade de variância entre os seus respectivos valores (ASSUMPÇÃO et al., 2007).

Segundo Isaaks e Srivastava (1989), a dependência espacial refere-se ao quanto o resultado de uma amostra pode influenciar sobre o resultado de outra amostra, tendo a distância como variável principal, em que amostras mais próximas tendem a apresentar resultados mais parecidos que quando as distâncias entre as amostras são maiores. O valor entre as amostras apresentam continuidade até determinada distância, a partir desse ponto as amostras não exercem influência mais sobre a outra, pois não apresenta mais dependência espacial e, portanto,

pode-se dizer que as unidades amostrais são aleatórias (GUIMARÃES, 2004). De acordo com Ribeiro Júnior (1995), os semivariogramas são preferidos para caracterizar a estrutura de continuidade espacial da variável avaliada por exigirem hipóteses de estacionaridade menos restritiva.

Segundo Burrough, Bouma e Yates (1994), a teoria das variáveis regionalizadas pressupõe que a variação de uma variável pode ser expressa pela soma de três componentes, são eles: componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante; componente aleatória, espacialmente correlacionada; e um ruído aleatório ou erro residual. O nível de dependência espacial entre duas variáveis regionalizadas (X e Y) é representado pelo semivariograma $\gamma(h)$, esse é definido como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados pelo vetor distância h (CAMARGO, 1998). Os valores de semivariância são encontrados pela seguinte equação (1):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (1)$$

Em que:

$\gamma(h)$ = semivariograma;

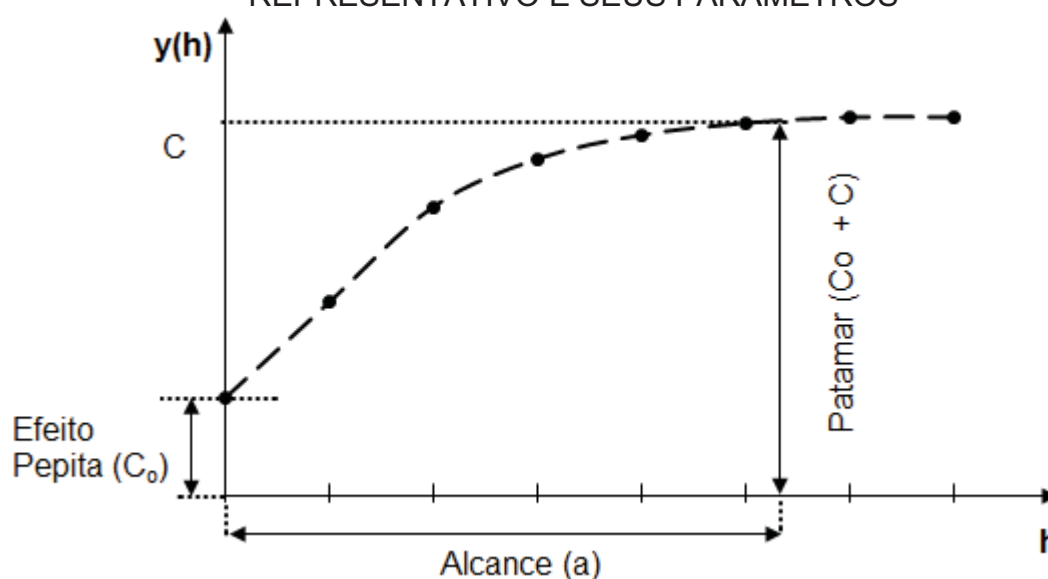
$N(h)$ = número de pares experimentais separados por uma distância h ;

$Z(x_i)$ = valor determinado em cada ponto amostrado;

$(x_i + h)$ = valor medido em um ponto mais uma distância h .

A dependência de um atributo em função da distância entre dois pontos é demonstrada com maior clareza a partir dos gráficos denominados semivariogramas, esses gráficos são gerados a partir dos dados de semivariância (GUIMARÃES, 2004). De acordo com Vieira (2000), os parâmetros que possuem a função de descrever a variabilidade espacial dos dados dentro de um semivariograma são: alcance (*range*), patamar (*sill*) e efeito pepita (*nugget effect*). A representação gráfica de um semivariograma pode ser observada na Figura 1.

FIGURA 1. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UM SEMIVARIOGRAMA REPRESENTATIVO E SEUS PARÂMETROS



FONTE: O autor (2018).

O alcance (a) controla o crescimento de y (μ), ele é o principal parâmetro produzido pela geoestatística. De acordo com Guerra (1988), o alcance corresponde ao conceito da zona de influência ou de dependência espacial de uma amostra, marcando a distância a partir da qual as unidades amostrais tornam-se independentes. Esse parâmetro representa a distância dentro da qual os valores de um determinado atributo são iguais entre si, desse modo, valores de um atributo, localizados dentro da área cujo raio é igual ao seu valor, possuem entre si extrema semelhança em magnitude (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985).

O patamar ($C_0 + C$) representa o valor do semivariograma correspondente ao seu alcance. Desse ponto em diante, toda a variância da amostra é de influência aleatória, correspondendo à variância total obtida pela estatística clássica (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). Considera-se então que não existe mais dependência espacial entre as unidades amostrais, pois a variância da diferença entre seus pares torna-se invariante com a distância (CAMARGO, 2001). O patamar permite a determinação da distância limite (alcance) entre dependência e independência entre unidades amostrais. Para grandes valores de h , o modelo pode ser classificado como modelos com patamar (esférico, exponencial e gaussiano) ou como modelos sem patamar (modelos com capacidade infinita de dispersão, não tem variância finita e a covariância não pode ser definida).

O efeito pepita indica a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as unidades amostrais, revelando a variância que não pôde ser identificada pelo semivariograma. Essa descontinuidade do semivariograma pode ocorrer seja pela necessidade de coletas amostrais às distâncias menores, seja pela ocorrência de um erro qualquer em alguma etapa do trabalho (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). Quanto menor for o valor do efeito pepita do semivariograma, menor será a variância da estimativa, ou seja, quanto menor for o efeito pepita para o patamar do semivariograma, maior a continuidade do fenômeno e maior a confiança que se pode ter na estimativa (GUIMARÃES, 2004). Na Figura 1 nota-se que o semivariograma é crescente e dependente de h , indicando a presença de dependência espacial, no entanto, se o semivariograma for constante e igual ao patamar para qualquer valor de h , têm-se o efeito pepita puro, em que há ausência total de dependência espacial e caracterizando uma distribuição espacial completamente aleatória.

Segundo Cambardella et al. (1994), a proporção é outro parâmetro pode ser extraído do semivariograma, a proporção define a porcentagem do efeito pepita no valor do patamar, estimando-se a dependência espacial das unidades amostrais. De acordo com o autor, a dependência espacial pode ser classificada como fraca ($< 25\%$), moderada ($25\% < \text{proporção} \leq 75\%$) e forte ($> 75\%$). Portanto, se o valor da proporção for igual a zero, significa a presença de efeito pepita puro. A proporção pode ser obtida por meio da equação 2.

$$\{[1-(C_0/C)]*100\} \quad (2)$$

Em que:

C_0 = efeito pepita;

C = patamar menos o efeito pepita.

No processo de interpolação, são necessários que os semivariogramas estejam devidamente ajustados, nos quais são estimados dados em toda a superfície, entre todos os pontos amostrados no processo de interpolação (GREGO; VIEIRA, 2005). Por isso, a escolha do modelo de semivariograma é de extrema importância na geoestatística, pois todos os cálculos dependem do modelo de

semivariograma ajustado. Se o modelo ajustado não for correto, os cálculos seguintes conterão erros que poderão afetar as inferências, logo o ajuste de semivariograma deve receber uma atenção especial (GUIMARÃES, 2004).

O processo de ajuste não do semivariograma não é direto e automático, ele deve ser interativo, em que o pesquisador deve verificar a adequação do modelo ao semivariograma experimental (CAMARGO, 1998). Dependendo do ajuste obtido, o modelo pode ou não ser redefinido, até obter um que seja considerado satisfatório. Existem diversos modelos que podem ser ajustados aos semivariogramas, os quais permitem visualizar a natureza da variação espacial das variáveis estudadas. Os modelos esférico, exponencial e gaussiano sobressaem-se dentre os demais modelos existentes (GUERRA, 1988), sobre tudo para os estudos de variáveis de interesse ambiental, como planta e solo (VIEIRA, 2000). Uma vez conhecido o semivariograma da variável, e havendo dependência espacial entre as unidades amostrais, podem ser interpolados valores em qualquer posição na área de estudo, sem tendência e com variância mínima (VIEIRA, 2000; CAMARGO, 1998).

Dentre os métodos para avaliar a qualidade de ajuste dos semivariogramas, destacam-se o Método dos Quadrados Mínimos Ordinários, Método dos Quadrados Mínimos Ponderados e Método da Máxima Verossimilhança (MELLO, 2004).

3.6.3 Interpolação

3.6.3.1 Krigagem

A interpolação permite visualizar o comportamento da variável na região através de um mapa de isolinhas ou de superfície (SILVA JUNIOR, 2001), possibilitando a predição de valores em pontos não amostrados. Dentre os diferentes métodos de interpolação, destacam-se a triangulação, o inverso da distância (ponderada ou não ponderada) e o vizinho mais próximo. No entanto, a variabilidade espacial da maioria dos fenômenos naturais não pode ser mapeada por simples funções matemáticas, pois esses métodos apresentam restrições quanto à representação da variabilidade espacial, visto que são fundamentados em estatística clássica, portanto supõe independência espacial entre as unidades amostrais (VIEIRA, 2000), desconsiderando a continuidade do fenômeno observado

(CAMARGO, 1998). Logo, a variabilidade espacial deve ser interpolada por meio da aplicação da krigagem.

O nome krigagem foi dado por Matheron (1963) em homenagem ao sul-africano Krige (VIEIRA, 2000). Esse interpolador trata-se de uma série de técnicas de análise de regressão que visa minimizar a variância estimada, a partir de um modelo prévio, que leva em consideração a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço (LANDIM, 1998). O valor estimado da variável é dado pela equação 3.

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

Em que:

$\hat{Z}(x_0)$ = valor estimado para local não amostrado;

N = número de valores medidos;

$Z(x_i)$ = valor obtido por amostragem em campo;

λ_i = peso associado ao valor medido na posição x_i .

A krigagem é um interpolador em que a estimativa se remete a uma média móvel ponderada. Pontos próximos da posição a ser interpolada têm maiores pesos que os mais distantes, e ainda, as distâncias consideradas não são somente entre o ponto a ser predito e os vizinhos, mas também entre os vizinhos (SILVA JÚNIOR, 2001). Dessa forma, para uma mesma distância, dados agrupados terão menores pesos, quando comparados individualmente com pontos isolados, pois esses dados trazem informações quase redundantes de uma mesma região (BARRETO, 2015).

De acordo com Vieira (2000) e Thompson (1992), a interpolação por meio da krigagem produz melhores estimativas, pois está embasada em duas premissas: não-tendenciosidade do estimador e variância mínima das estimativas. A krigagem gera a incerteza associada a cada valor predito.

Há diversos tipos de krigagem, dentre elas destaca-se a krigagem simples, krigagem ordinária, krigagem universal, krigagem disjuntiva, krigagem indicativa, krigagem bayesiana, cokrigagem, etc. Segundo Landim e Sturaro (2002), os tipos mais utilizados são a krigagens simples e a ordinária. A krigagem simples é usada

quando a média é constante para toda a área de estudo, já a krigagem ordinária considera a média móvel para toda a área.

3.6.3.2 Cokrigagem

A cokrigagem é uma técnica geoestatística na qual diversas variáveis regionalizadas podem ser estimadas em conjunto, com base na correlação espacial entre elas (LANDIM; STURARO; MONTEIRO, 2002; LANDIM, 1998; ANGELICO, 2006; OLEA, 1999). Trata-se de uma extensão multivariada da krigagem, visto que o modelo trata com dois ou mais atributos dentro do mesmo campo aleatório (OLEA, 1999), que de acordo com Isaacks e Srivastava (1989) possibilita uma combinação linear de variáveis primárias e secundárias, a qual permite a inferência de uma através do conhecimento das outras. Para a utilização da cokrigagem é fundamental a verificação prévia de duas condicionantes, são elas: deve haver correlação entre as variáveis envolvidas na análise e, as variáveis devem apresentar dependência espacial (VIEIRA, 2000). Para que se obtenha bons resultados com a cokrigagem, se faz necessário que alterações no comportamento da variável secundária possam explicar, ao menos parcialmente, alterações na variável primária (VIOLA et al., 2010).

Segundo Guimarães (2004), o raciocínio para a dedução do sistema de equações da cokrigagem é idêntico ao da krigagem, no entanto nesse caso, envolve variáveis secundárias. Para estimar valores Z_1^* , para qualquer local X_0 , o valor estimado deve ser uma combinação linear de ambos Z_1 e Z_2 (VIEIRA, 2000), conforme equação 4. Dentre os vários tipos de cokrigagem, destacam-se as cokrigagens simples, ordinária, colocalizada e universal.

$$Z_1^*(X_0) = \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_{1i} Z_1(X_{1i}) + \sum_{i=1}^{n_2} \lambda_{2i} Z_2(X_{2i}) \quad (4)$$

Em que:

$Z_1^*(X_0)$ = estimativa da variável primária no ponto x_0 ;

Z_1 e Z_2 = variáveis primária e secundária;

n_1 e n_2 = números de vizinhos de Z_1 e Z_2 ;

λ_{1i} e λ_{2i} = pesos associados a cada valor de Z_1 e Z_2 .

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram avaliados plantios comerciais de acácia-negra (*Acacia mearnsii*) situados em uma das regiões de maior concentração de plantios no estado do Rio Grande do Sul. O estudo foi idealizado a partir da necessidade de estabelecer relação entre os fatores do meio físico e o potencial produtivo da acácia-negra, em diferentes sítios, para posterior definição de Unidades de Manejo.

4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1.1 Localização

O estudo foi conduzido em plantios comerciais de acácia-negra, situados no município de Cristal, região da Encosta do Sudeste no estado do Rio Grande do Sul, e constituído por três povoamentos seminais implantados nos anos de 2003, 2004 e 2005, com áreas de 454,2; 469,6; e 15,3 hectares, respectivamente, perfazendo o total de 939,1 hectares de efetivo plantio.

Os povoamentos estão sob coordenadas centrais 30°55' S e 52°10' W. Os plantios foram estabelecidos em áreas novas e em áreas de reforma, portanto, primeira e segunda rotação, respectivamente. Em todos os casos, o preparo do solo foi o de cultivo mínimo, realizado na linha de plantio, com uma subsolagem com três hastes a 40 cm de profundidade e duas gradagens. Durante o plantio foram adicionados 50 g de NPK (5-30-15) por planta. Os plantios foram realizados sob espaçamento de 3 m X 1,75 m e 3 m X 1,5 m.

4.1.2 Geomorfologia e Geologia

A Encosta do Sudeste está situada entre as grandes lagoas de Patos e Mirim e a Serra do Sudeste. A região apresenta uma faixa de sedimentos arenosos e aluviões holocênicos ao longo dos rios, estando cortada por esporões de granito entre Jaguarão e Pelotas e magnetitos entre Pelotas e Camaquã e, também, entre Camaquã e Guaíba, ambos pré-cambrianos. O relevo é considerado plano, com

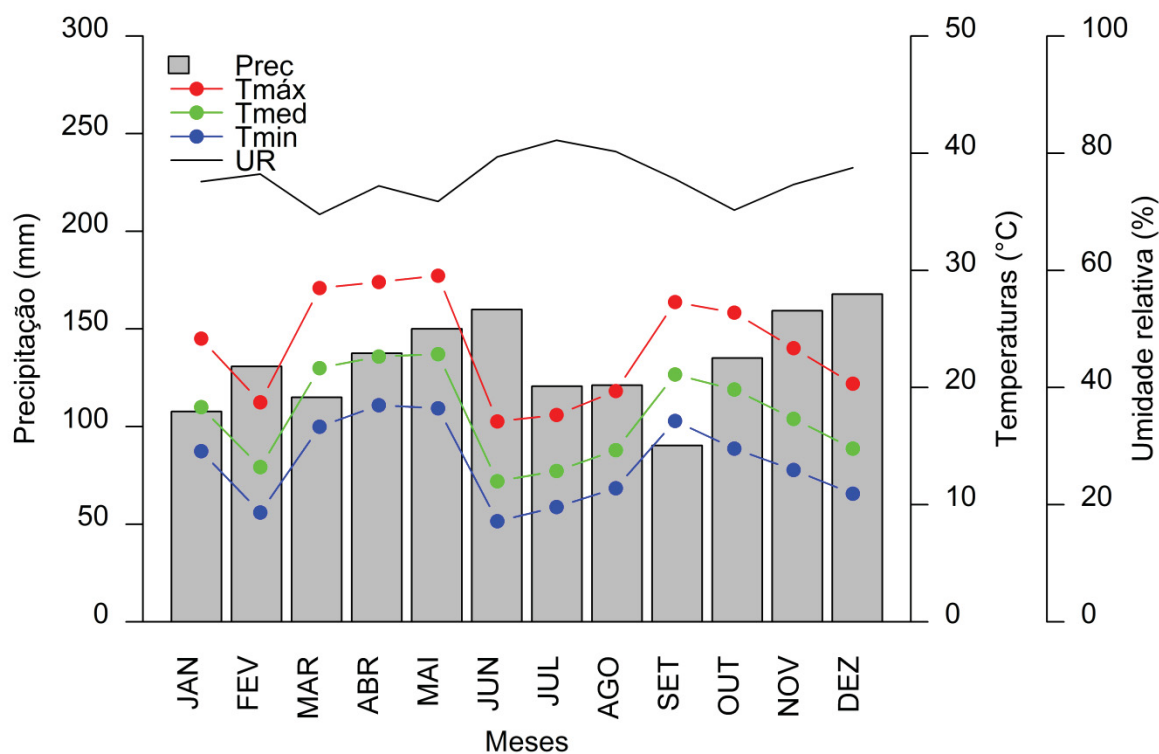
altitude inferior a 30 m, exceto os esporões que alcançam até 200 m, onde encontram-se os campos secos e as florestas latifoliadas altas (SEMA, 2001).

4.1.3 Clima

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região de estudo se enquadra na zona fundamental temperada moderada ou “C”, determinada pelas isothermas do mês mais frio compreendidas entre -3 e 18 °C, tipo climático temperado úmido (Cf), apresentando chuvas distribuídas por todo o ano, com precipitações mensais superiores a 60 mm. As isothermas do mês mais quente delimitam as variedades Cfa e Cfb, que apresentam a temperatura média do mês mais quente, respectivamente, superior e inferior a 22°C (MORENO, 1961).

As principais características climáticas da região estudada são: i) temperatura média anual de 18 °C; ii) temperatura mínima absoluta de -3,6 °C; iii) média de 24,2 geadas ao ano; iv) precipitação anual de 1309 mm; v) média de 96,5 dias de chuva por ano; vi) deficiência hídrica de 15 mm; e vii) umidade relativa de 80% (RIO GRANDE DO SUL, 1994). Durante o período de condução do povoamento, os dados meteorológicos: temperatura média máxima, média mínima e média do ar, umidade relativa do ar, precipitação foram obtidos junto ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) da Estação Climatológica do município de Encruzilhada do Sul, a mais próxima do local do estudo para o período em avaliação do povoamento, distante aproximadamente 68 km de Cristal (Figura 2).

FIGURA 2. DISTRIBUIÇÃO MÉDIA MENSAL DE PRECIPITAÇÃO, TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL



FONTE: O autor (2018).

4.1.4 Vegetação

A vegetação original predominante na Encosta do Sudeste é a Floresta Estacional Semidecidual, Estepe Gramíneo-Lenhosa e Formações Pioneiras (RIO GRANDE DO SUL, 1994). Essas regiões sofreram processo de ocupação, sendo encontrados fragmentos da Floresta Semidecidual em áreas de maior dificuldade à utilização agrícola. As áreas de Estepe, apesar de ter sido bastante antropizadas pela utilização pecuária, mantêm grande parte da vegetação original (MOCHIUTTI, 2007).

4.1.5 Solo

Na Encosta do Sudeste predominam os Argissolos, Neossolos e Cambissolos, nos topos e encostas; e Planossolos e Gleissolos, nas áreas baixas e

planas (RIO GRANDE DO SUL, 1994; SEMA, 2001). Entretanto, na área de estudo são encontrados Argissolos vermelho-amarelo e Planossolos hidromórficos.

Os argissolos abrangem solos minerais, não-hidromórficos, geralmente profundos, definidos pela presença de um horizonte B textural e argila de baixa atividade, cuja fração tem o predomínio da caulinita e óxidos. Esses solos podem apresentar limitações químicas devido à baixa fertilidade natural, forte acidez e alta saturação por alumínio. São suscetíveis à erosão hídrica, devido à presença do horizonte subsuperficial mais argiloso, que reduz drasticamente a infiltração da água e aumenta a possibilidade de escoamento superficial (EMBRAPA, 1999; SEMA, 2001).

Os planossolos são solos minerais, profundos, com horizonte B muito espesso e uma sequência de horizontes A, B e C pouco diferenciados. São solos com alta permeabilidade de água, podendo ser trabalhados em grande amplitude de umidade. Apresentam tendência a formar crostas superficiais, no entanto, isso deve ser evitado, mantendo-se o terreno com cobertura vegetal. Os latossolos são muito intemperizados, com pequena reserva de nutrientes para as plantas e, portanto, são solos com grandes problemas de fertilidade (EMBRAPA, 1999; SEMA, 2001).

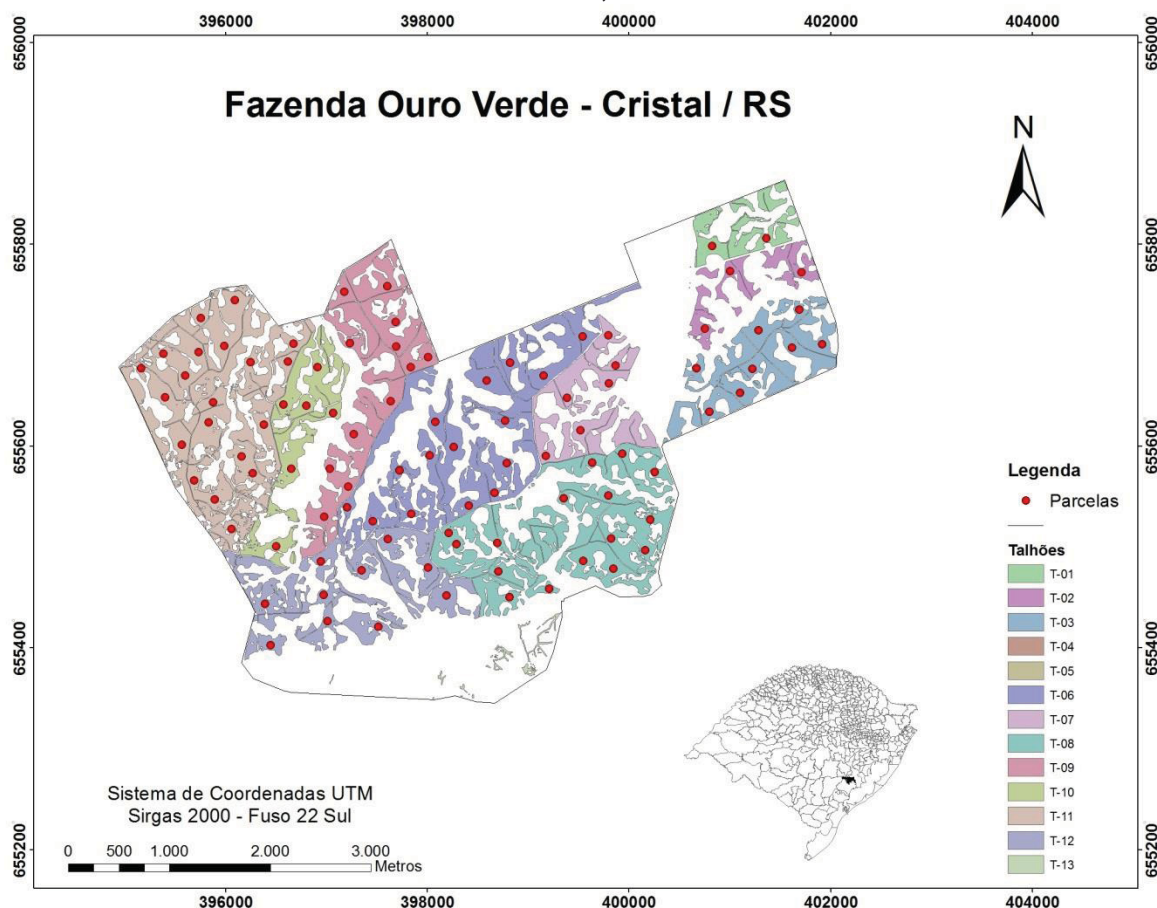
4.2 ORIGEM DOS DADOS

4.2.1 Inventário Florestal

Foram demarcadas 91 unidades amostrais (parcelas de inventário florestal temporárias) de 450 m², sendo 1 parcela com 9 anos, 48 parcelas com 10 anos e 42 parcelas com 11 anos de idade, nas quais foram medidos os diâmetros à altura do peito (dap), em centímetros (cm), de todos os indivíduos (6.927 árvores) e as alturas totais (ht), em metros (m), de aproximadamente 34% dos indivíduos (2373 árvores). O método e o processo de amostragem adotados foram o de área fixa e aleatória simples, respectivamente. A alocação das unidades amostrais pode ser visualizada na Figura 3. Foram cubadas 273 (3 árvores por parcela), pelo método de Smalian, para a obtenção dos respectivos volumes rigorosos individuais (v), em metros cúbicos (m³). A seleção dos indivíduos para a cubagem ocorreu dentro da amplitude

diamétrica do povoamento. Adicionalmente, foi tomada a altitude e a profundidade efetiva do solo em cada unidade amostral (variáveis de posicionamento).

FIGURA 3. LOCALIZAÇÃO DAS UNIDADES AMOSTRAIS SITUADAS NA FAZENDA OURO VERDE, PROPRIEDADE DA TANAGRO S.A



FONTE: O autor (2018).

4.2.2 Análises químicas e granulométricas

A uniformização da metodologia analítica é essencial para a correta interpretação dos resultados. Diante disso, as amostras de solos foram coletadas no centro de cada uma das 91 unidades amostrais. Em seguida, foram enviadas para análises no Laboratório de Solos da Universidade Federal de Pelotas, em Pelotas – RS. As determinações foram feitas seguindo o recomendado no Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO, 2004).

4.2.2.1 Análises químicas

- ✓ **pH do solo:** determinado por potenciômetro na suspensão solo-água, na proporção 1:1. Na análise usou-se 10 cm³ de solo e 10 mL de água;
- ✓ **Fósforo extraível (P):** determinado pelo método Mehlich-1, a fração foi extraída por uma solução composta pela mistura de ácido clorídrico (0,05 mol.L⁻¹) e ácido sulfúrico (0,0125 mol.L⁻¹). O teor obtido representa o P na solução, o P adsorvido na superfície de óxidos e hidróxidos de Fe e de Al e, em menor quantidade, o P ligado ao Ca. A determinação foi feita por colorimetria, empregando molibdato de amônio e uma solução redutora. Os teores são expressos em mg.dm⁻³. Na análise usou-se 3 cm³ de solo;
- ✓ **Potássio extraível (K⁺):** Utilizou-se também o extrator de Mehlich-1. O teor de potássio no extrato foi determinado por fotometria de chama. A quantidade extraída é semelhante ao teor de potássio trocável, extraído com acetato de amônio. O teor é expresso em mg.dm⁻³;
- ✓ **Sódio trocável (Na⁺):** a fração foi extraída no extrator de Mehlich-1. Determinado por fotometria de chama. Na análise utilizou-se a mesma amostra da determinação de fósforo;
- ✓ **Matéria orgânica (MO):** determinada por combustão úmida, utilizando-se dicromato de sódio e ácido sulfúrico. A matéria orgânica foi oxidada e o dicromato reduzido, ocorrendo modificação na cor da solução, que é proporcional ao teor de matéria orgânica do solo. A determinação da intensidade da cor da solução foi feita por colorimetria. Com base no teor de matéria orgânica, avalia-se, indiretamente, a disponibilidade de nitrogênio do solo. Os valores são expressos em % (m.v⁻¹). Na análise usou-se 1,5 cm³ de solo;
- ✓ **Teor de argila:** a determinação do teor de argila do solo foi feita pelo método do densímetro, após dispersão com álcali, sendo expressa em % (m.v⁻¹). Essa determinação é necessária para estabelecer a classe textural e a interpretação do teor de fósforo do

solo extraído pelo método Mehlich-1. Na análise usou-se 10 cm³ de solo;

- ✓ **Cálcio, magnésio e alumínio trocáveis (Ca⁺², Mg⁺² e Al⁺³, respectivamente):** extraídos por cloreto de potássio 1 mol.L⁻¹. Numa fração do extrato, o alumínio foi titulado com hidróxido de sódio, na presença de azul de bromotimol (ou fenolftaleína). Em outra fração, o cálcio e o magnésio foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. Primeiro foi feita a titulação de Ca + Mg e, depois, a do Ca, calculando-se o teor de Mg por diferença. Os teores são expressos em cmolc.dm⁻³. Na análise usou-se 2,5 cm³ de solo;
- ✓ **Manganês (Mn):** determinado por espectrofotometria de absorção atômica no mesmo extrato da solução de Mehlich-1, representando o manganês trocável; os valores são expressos em mg.dm⁻³. Utilizou-se a mesma solução da determinação de fósforo e potássio;
- ✓ **Cobre e zinco (Cu e Zn, respectivamente):** extraídos com HCl 0,1 mol.L⁻¹ e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; os valores foram expressos em mg/dm³. Na análise usou-se 10 cm³ de solo;
- ✓ **Ferro (Fe):** extraído com oxalato de amônio a pH 3,0, sendo determinado por espectrofotometria de absorção atômica. A forma química extraída é o ferro de compostos amorfos (ou de baixa cristalinidade) do solo; os valores foram expressos em g.dm⁻³. Na análise usou-se 1,5 cm³ de solo;
- ✓ **Capacidade de troca de cátions (CTC):** calculada pela soma dos cátions de reação básica trocáveis (K⁺; Ca⁺²; Mg⁺²) e dos cátions ácidos (H⁺ + Al⁺³). Para o cálculo da CTC ao pH natural do solo (na análise), denominada CTC efetiva, é somado o cátion Al⁺³ aos cátions de reação básica;
- ✓ **Acidez potencial (H + Al):** determinado por potenciômetro na suspensão solo-água, na proporção de 1:1. Na análise usou-se 10 cm³ de solo e 10 mL de água;

- ✓ **Saturação da CTC efetiva por Al^{+3} :** A saturação por Al é calculada pela equação 5:

$$Sat. Al = \frac{Al \cdot 100}{CTC_{efetiva}} \quad (5)$$

- ✓ **Saturação da CTC efetiva por Ca^{+2} :** A saturação por Ca é calculada pela equação 6:

$$Sat. Ca = \frac{Ca \cdot 100}{CTC_{efetiva}} \quad (6)$$

- ✓ **Saturação da CTC efetiva por Mg^{+2} :** A saturação por Mg é calculada pela equação 7:

$$Sat. Mg = \frac{Mg \cdot 100}{CTC_{efetiva}} \quad (7)$$

- ✓ **Saturação da CTC $pH\ 7,0$ por bases:** A fração da CTC (calculada a $pH\ 7,0$) ocupada pelos cátions de reação básica representa a porcentagem das cargas negativas do solo neutralizadas por cátions de reação básica, denominada saturação por bases (valor V), sendo calculada pela equação 8:

$$V = \frac{S \cdot 100}{CTC_{pH7,0}} \quad (8)$$

Em que:

S = soma dos cátions de reação básica ($Ca^{+2} + Mg^{+2} + K^{+} + Na^{+2}$) em $cmol_c \cdot dm^{-3}$.

- ✓ **Relações entre cátions:** Ca/Mg, Ca/K e Mg/K calculadas utilizando-se as unidades iguais de expressão de resultados.

4.2.2.2 Análises granulométricas

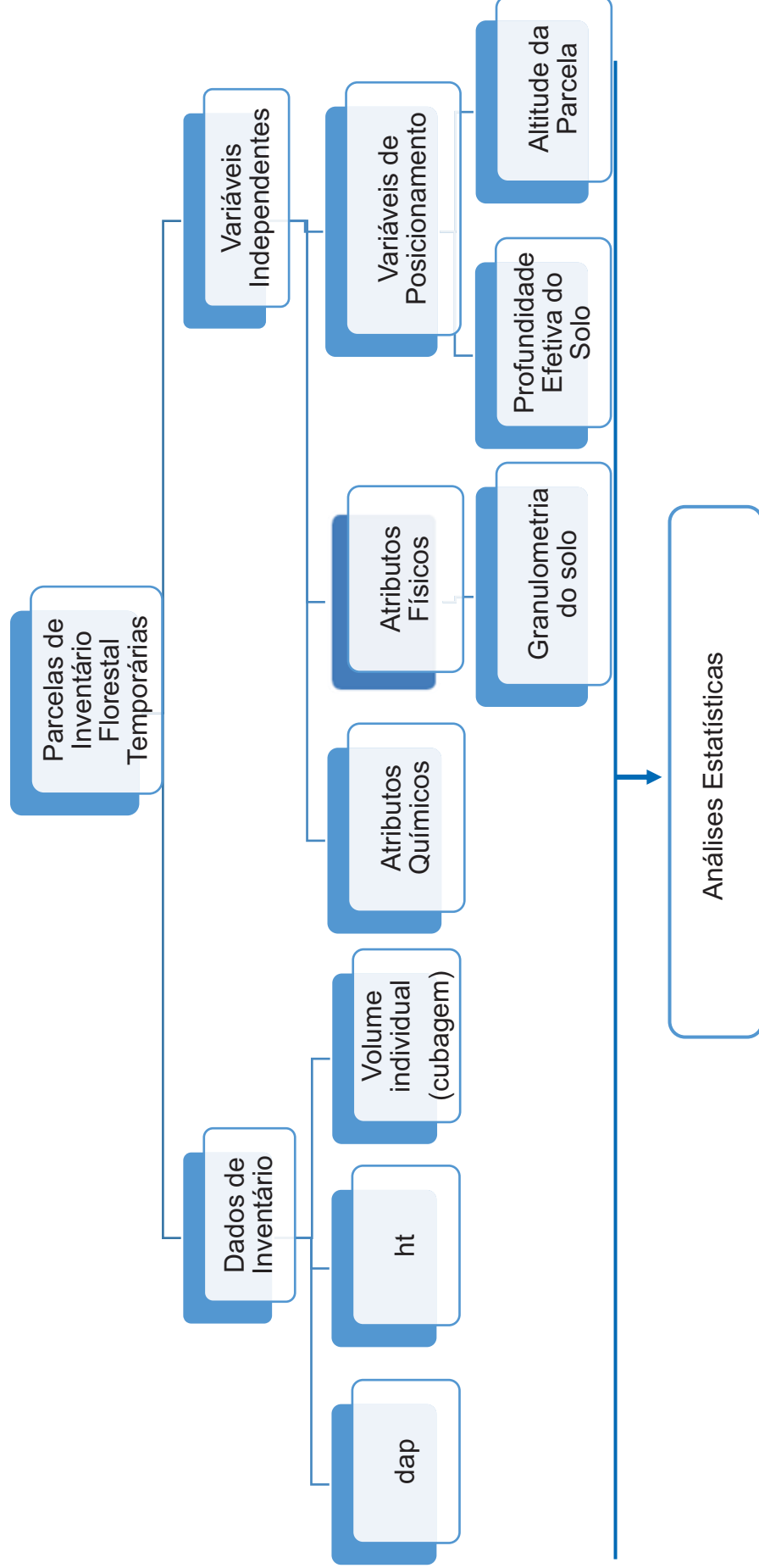
Para a caracterização granulométrica do solo, as seguintes determinações foram realizadas:

- ✓ Calhaus e cascalhos: separados por tamisação, utilizaram-se peneiras de malha de 20 mm e 2 mm, para a retenção dos calhaus e dos cascalhos, respectivamente. A amostra foi preparada mediante secagem ao ar e destorroamento;
- ✓ Terra fina: separada por tamisação, no mesmo fracionamento comum à anterior, recolhendo-se o material mais fino passado em peneira de malha 2 mm de furos circulares;
- ✓ Composição granulométrica: dispersão com hexametáfosfato de sódio 4,4%, e agitação de alta rotação durante quinze minutos. Areia grossa e areia fina separadas por tamisação em peneiras de malha de 0,2 mm e 0,053 mm, respectivamente. Argila determinada pelo método da pipeta. Silte obtido por diferença.

4.2.3 Tabulação dos dados

Após a obtenção dos dados, eles foram tabulados para, posterior, análises estatísticas (Figura 4). A partir do dap foi possível calcular o \overline{DAP} (DAP médio por parcela) e a área transversal para cada árvore (g), em metros quadrados (m^2). Com a ht, foi possível calcular a \overline{HT} (altura total média), a altura dominante (HDOM) e o Índice de Sítio (IS) para cada parcela. De posse do volume individual das árvores, foi obtido o volume total (V), em metros cúbicos por hectare ($m^3.ha^{-1}$), por parcela, e a soma das áreas transversais das árvores de cada parcela permitiu o cálculo da área basal (G), em metros quadrados por hectare ($m^2.ha^{-1}$), por parcela. Todas as análises estatísticas foram desenvolvidas no *software* R CORE TEAM (2016)

FIGURA 4. FLUXOGRAMA DA OBTENÇÃO DOS DADOS COLETADOS EM PARCELAS DE INVENTÁRIO FLORESTAL TEMPORÁRIAS EM PLANTIO COMERCIAL DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL



FONTE: O autor (2018).

4.3 PROCESSAMENTO DO INVENTÁRIO FLORESTAL

4.3.1 Ajuste de equações hipsométricas e volumétricas

Com base nas medições do dap e ht, foram ajustados modelos de relação hipsométrica (Tabela 1) visando indicar a melhor equação para todas as idades.

TABELA 1. MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR A ALTURA EM POVOAMENTOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL

Número do Modelo	Modelo
1	$ht = \beta_0 + \beta_1 \log dap$
2	$ht = \beta_0 + \beta_1 dap^2$
3	$ht = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 dap^2$
4	$ht = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{dap}$
5	$ht = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{dap} + \beta_2 \frac{1}{dap^2}$
6	$ht = \beta_0 + \beta_1 dap$
7	$ht = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 dap^2 + \beta_3 dap^3$
8	$ht = \beta_0 + \beta_1 \log dap^2$
9	$\log ht = \beta_0 + \beta_1 dap$
10	$\log ht = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{dap} + \beta_2 \frac{1}{dap^2}$
11	$\log ht = \beta_0 + \beta_1 \log dap^2$
12	$\log ht = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 dap^2$
13	$\log ht = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{dap}$
14	$\log ht = \beta_0 + \beta_1 \log dap$
15	$\log ht = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{dap} + \beta_2 dap$

FONTE: O autor (2018).

Em que: ht = altura total em metros; dap = diâmetro à altura do peito em centímetros; log = logaritmo na base 10; e bn = coeficientes de regressão.

Com os volumes rigorosos obtidos a partir da cubagem das árvores foi possível também estabelecer a relação volumétrica para o povoamento florestal (Tabela 2).

TABELA 2. MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR O VOLUME INDIVIDUAL EM POVOAMENTOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL

Autor do Modelo	Modelo
Schumacher-Hall	$\log v = \beta_0 + \beta_1 \log dap + \beta_2 \log ht$
Spurr	$v = \beta_0 + \beta_1 dap^2 ht$
Husch	$\log v = \beta_0 + \beta_1 \log dap$

FONTE: O autor (2018).

Em que: v = volume individual em metros cúbicos; dap = diâmetro à altura do peito em centímetros; ht = altura total em metros; \log = logaritmo na base 10; β_n = coeficientes de regressão.

Para a correção da discrepância logarítmica dos modelos logarítmicos, foi efetuado o recálculo das estatísticas de ajuste aplicando o Fator de Correção de Meyer (equação 9).

$$FCM = 10^{0,5 \cdot (S_{yx}^2)} \quad (9)$$

Em que:

S_{yx} = erro padrão da estimativa.

Para avaliar os modelos foram utilizados quatro diferentes critérios de avaliação de desempenho: coeficiente de determinação de Schlaegel ($R^2_{aj.}$), erro padrão da estimativa percentual ($S_{yx}\%$), Critério de Informação de Akaike (AIC) e análise gráfica dos resíduos. A análise gráfica dos resíduos foi aplicada como forma de visualizar os desvios entre os valores reais e os valores estimados, e identificar se existem tendências na distribuição dos resíduos da equação. A homogeneidade da variância, a normalidade e independência dos resíduos foram verificadas por meio dos testes de Breush-Pagan, Shapiro-Wilk e Durbin-Watson, respectivamente, todos ao nível de 5% de probabilidade.

4.3.2 Índice de Sítio

A variável utilizada para caracterizar a qualidade do sítio do povoamento comercial de acácia-negra foi o Índice de Sítio (IS_7) dado pela altura dominante (HDOM) aos 7 anos de idade. Como as idades de medições dos povoamentos variaram entre 9 e 11 anos, todas as alturas dominantes foram projetadas para os 7 anos de idade por meio da equação disponível no *software* “SISACACIA” (MAESTRI, 1992), dada por (equação 10):

$$\text{HDOM} = 16,06529 * (1 - \exp(-0,0625228 * (I)))^{2,8129650} \quad (10)$$

Em que:

HDOM = altura dominante;

I = idade.

4.4 MODELAGEM DO ÍNDICE DE SÍTIO

4.4.1 Análise de Correlação Linear

Objetivando-se a modelagem do índice de sítio, foi construída uma matriz de correlação linear simples (correlação linear de Pearson) entre o índice de sítio aos 7 anos (IS_7) e as 29 variáveis do meio físico (variáveis independentes). Adicionalmente, também foram avaliadas as correlações lineares das variáveis do meio físico frente às variáveis: $\overline{\text{DAP}}$, $\overline{\text{HT}}$, HDOM, V e G.

4.4.2 Análise de Trilha (*Path analysis*)

A análise de trilha compreendeu na avaliação dos efeitos diretos e indiretos das variáveis independentes (variáveis de posicionamento, variáveis químicas e granulométricas do solo) sobre a variável dependente IS_7, cuja estimativa foi obtida através de equação de regressão linear múltipla, previamente padronizada (regressão parcial padronizada). A padronização das variáveis foi realizada por meio

da divisão do desvio de cada variável observada em relação à média pelo desvio padrão da variável (equação 11):

$$u_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\hat{\sigma}_X} \quad (11)$$

Em que:

u_i = variável padronizada;

X_i = variável observada;

\bar{X} = média da variável observada;

$\hat{\sigma}_X$ = desvio padrão.

A variável dependente Y e as variáveis independentes ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) consideradas neste estudo se relacionam por meio do seguinte modelo (LI, 1975) (equação 12):

$$Y_i - \bar{Y} = b_{01}(X_1 - \bar{X}_1) + b_{02}(X_2 - \bar{X}_2) + b_{03}(X_3 - \bar{X}_3) + \dots + b_{0n}(X_n - \bar{X}_n) + \varepsilon \quad (12)$$

Em que:

Y_i = variável dependente ou principal (IS_7);

\bar{Y} = média da variável dependente;

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ = variáveis independentes;

$b_{01}, b_{02}, b_{03}, \dots, b_{0n}$ = coeficientes da regressão parcial padronizada;

ε = variável residual.

De maneira correspondente, tem-se o modelo (equação 13):

$$\frac{Y - \bar{Y}}{\sigma_y} = b_{01} \frac{\sigma_{x1}}{\sigma_y} \frac{X_1 - \bar{X}_1}{\sigma_{x1}} + b_{02} \frac{\sigma_{x2}}{\sigma_y} \frac{X_2 - \bar{X}_2}{\sigma_{x2}} + b_{03} \frac{\sigma_{x3}}{\sigma_y} \frac{X_3 - \bar{X}_3}{\sigma_{x3}} + \dots + b_{0n} \frac{\sigma_{xn}}{\sigma_y} \frac{X_n - \bar{X}_n}{\sigma_{xn}} + \frac{\sigma_\varepsilon}{\sigma_y} \frac{\varepsilon}{\sigma_\varepsilon} \quad (13)$$

De que se obtém (equação 14):

$$y = p_{01}x_1 + p_{02}x_2 + p_{03}x_3 + \dots + p_{0n}x_n + p_\varepsilon u \quad (14)$$

Em que:

$$y = (Y - \bar{Y}) / \sigma_y;$$

$$x_i = (X_i - \bar{X}_i) / \sigma_{x_i};$$

$$u = \varepsilon / \sigma_\varepsilon;$$

$$p_{0i} = (b_{0i} \sigma_{x_i}) / \sigma_y;$$

$$p_\varepsilon = \sigma_\varepsilon / \sigma_y.$$

A decomposição das correlações r_{0i} em efeitos diretos de x_i sobre a variável dependente, expresso por \hat{p}_{0i} , e os efeitos indiretos de x_i via x_j , expresso por $\hat{p}_{0j}r_{ij}$ é apresentada a seguir (equações 15, 16, 17 e 18):

$$\text{Cov}(y, x_1) = r_{01} = \hat{p}_{01} + \hat{p}_{02}r_{12} + \hat{p}_{03}r_{13} + \dots + \hat{p}_{0n}r_{1n} \quad (15)$$

$$\text{Cov}(y, x_2) = r_{02} = \hat{p}_{01}r_{12} + \hat{p}_{02} + \hat{p}_{03}r_{23} + \dots + \hat{p}_{0n}r_{2n} \quad (16)$$

$$\text{Cov}(y, x_3) = r_{03} = \hat{p}_{01}r_{13} + \hat{p}_{02}r_{23} + \hat{p}_{03} + \dots + \hat{p}_{0n}r_{3n} \quad (17)$$

$$\text{Cov}(y, x_n) = r_{0n} = \hat{p}_{01}r_{1n} + \hat{p}_{02}r_{2n} + \hat{p}_{03}r_{3n} + \dots + \hat{p}_{n-1}r_{n-1 n} + \hat{p}_{0n} \quad (18)$$

Desse modo, foi avaliado qual grupamento, ou quais grupamentos de variáveis, mais explica as variações de Y_i (produtividade potencial) e, dentro de cada grupamento, quais as variáveis de maior grau de importância quanto aos efeitos diretos e indiretos sobre a produtividade potencial.

Além do coeficiente de determinação (R^2) obtido a partir do modelo de regressão linear múltiplo, que apresenta o efeito das variáveis independentes sobre Y , a análise de trilha permite determinar o efeito residual (E) das variáveis não incluídas no modelo. O efeito da variável residual sobre a variável dependente é dado por (equação 19):

$$\hat{p}_\varepsilon = \sqrt{1 - R^2} \quad (19)$$

Segundo Li (1975), o efeito da variável residual serve para analisar se os efeitos diretos ou indiretos das variáveis dependentes sobre Y devem ou não ser

levadas em conta no estudo. Caso o coeficiente que exprime o efeito direto e indireto das variáveis independentes sobre Y, coeficiente de trilha determinado pelo método de mínimos quadrados, seja menor que o valor residual, significa que esta variável independente deve explicar as alterações na variável principal (Y) apenas indiretamente. Ou seja, essa variável se avaliada individualmente, não é suficiente para explicar as diferenças no crescimento e/ou produtividade. Por outro lado, um coeficiente de trilha maior que o valor residual aponta que existe efeito direto da variável independente sobre a variável independente.

4.4.3 Redução da dimensionalidade dos dados

4.4.3.1 Teste de Esfericidade de Bartlett

O teste de esfericidade, desenvolvido por Bartlett (1950), testa a hipótese de que as variáveis não sejam correlacionadas na população. Esse teste antecede a análise de componentes principais, pois, se as variáveis forem altamente independentes umas das outras, os componentes principais podem não ser apropriados. O teste verifica se a matriz de correlação deve ser decomposta, em primeiro lugar, em fatores. Se trata de um teste de Qui-quadrado aproximado com um teste estatístico que é função do determinante da matriz de correlação R (LATTIN; CARROLL; GREEN, 2011), como apresentado a seguir (equação 20):

$$\chi^2 \left[\frac{(p^2-p)}{2} \right] = - \left[(n-1) - \frac{(2p+5)}{6} \right] \ln|R| \quad (20)$$

Em que:

$\ln|R|$ = log natural do determinante da matriz de correlação;

$(p^2-p)/2$ = número de graus de liberdade associado ao teste estatístico de Qui-quadrado;

p = número de variáveis;

n = número de observações.

O determinante da matriz de correlação é uma medida generalizada da variância, que pode ser calculado por meio do produto dos autovalores da matriz:

$$|R| = \prod_{j=1}^p \lambda_j$$

Desse modo, quando as variáveis são de fato reciprocamente independentes, espera-se que R se aproxime da matriz identidade I.

4.4.3.2 Análise de Componentes Principais (ACP)

O que se pretende com a aplicação da ACP é condensar a informação contida em várias variáveis originais em um conjunto menor de variáveis estatísticas com uma perda mínima de informação (HAIR et al., 2005). Ou seja, se houver uma redundância substancial no conjunto de dados, então é possível explicar a maioria das informações do conjunto original de dados com um número relativamente pequeno de componentes. Essa redução da dimensão torna mais direta a visualização dos dados e sua subsequente análise, mais administrável (LATTIN; CARROLL; GREEN, 2011).

A obtenção dos componentes principais envolve a decomposição da matriz de covariâncias do vetor aleatório de interesse. A análise consistiu em transformar o conjunto de n variáveis independentes, previamente padronizadas, $x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}$ em um novo conjunto $Y_{i1}, Y_{i2}, Y_{i3}, \dots, Y_{in}$, em que os Y_i 's são funções lineares dos x_i 's e independentes entre si, isto é, os componentes são não correlacionados. Em outras palavras, se $Y_{ij}, Y_{ij'}$ e $Y_{ij''}$ são três componentes principais distintas (equações 21, 22 e 23):

$$Y_{ij} = a_1 x_{i1} + a_2 x_{i2} + a_3 x_{i3} + \dots + a_n x_{in} \quad (21)$$

$$Y_{ij'} = b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + b_3 x_{i3} + \dots + b_n x_{in} \quad (22)$$

$$Y_{ij''} = c_1 x_{i1} + c_2 x_{i2} + c_3 x_{i3} + \dots + c_n x_{in} \quad (23)$$

Então,

$$\sum_j a_j^2 = \sum_j b_j^2 = \sum_j c_j^2 = 1$$

$\sum_j a_j b_j c_j = 0$, ou seja, os componentes não estão correlacionados.

No meio de todos os componentes, Y_{i1} apresenta a variância máxima, Y_{i2} a segunda maior variância, Y_{i3} a terceira maior variância e assim sucessivamente. Do mesmo modo, o primeiro componente principal também apresenta o maior dos n autovalores estimados, seguido pelo segundo componente principal, terceiro componente e assim por diante. Após determinados os componentes principais, os seus escores ou, valores numéricos, foram calculados para cada elemento amostral. Desde modo, os valores de cada componente foram analisados utilizando a análise de variância. A interpretação dos componentes principais foi realizada com base nas correlações entre as variáveis originais e os componentes obtidos.

A importância relativa de um componente é avaliada pela porcentagem da variância total que ele explica, ou seja (equação 24):

$$\text{importância de } Y_j = \frac{V(Y_j)}{\sum V(Y_j)} = \frac{\lambda_j}{\sum \lambda_j} = \frac{\lambda_j}{\text{traço (R)}} \quad (24)$$

Em que:

$V(Y_j)$ = variância do componente principal j ;

λ_j = autovalor do componente principal j ;

Traço (R) = variância total por todos os componentes principais.

Foram utilizados dois critérios para definir o número de componentes principais retidos na análise: Critério de Kaiser (1960), mantendo na análise os componentes principais correspondentes aos autovalores maiores que 1 (um), e Critério de porcentagem de variância, mantendo o número de componentes principais que acumulem pelo menos 70% da variabilidade total dos dados (Johnson; Wichern, 1998).

4.4.4 Regressão Linear Múltipla

Segundo Lavoranti (2005), a regressão linear múltipla é uma metodologia da análise estatística que utiliza as relações entre duas ou mais variáveis quantitativas, de tal forma que uma variável pode ser predita a partir de outras. Na fórmula 25 é possível observar o modelo linear geral para análise de regressão linear múltipla:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni} + \varepsilon_i \quad (25)$$

Em que:

Y_i : valor observado da variável dependente Y no nível i das variáveis independentes X_i 's;

β_0 : constante de regressão (intercepto da equação de regressão com o eixo y);

β_1 : coeficiente de regressão (variação de Y em função da variação de uma unidade de X_1);

β_2 : coeficiente de regressão (variação de Y em função da variação de uma unidade de X_2);

β_n : coeficiente de regressão (variação de Y em função da variação de uma unidade de X_n);

X_{1i} : valor da variável X_1 , no nível i;

X_{2i} : valor da variável X_2 , no nível i;

X_{ni} : valor da variável X_n , no nível i;

ε_i : erro ou desvio associado a distância entre o valor observado Y_i e o valor estimado \hat{Y}_i com base na equação de regressão.

Para a seleção do melhor modelo de regressão, utilizou-se o procedimento Seleção por Etapas (*"The stepwise regression procedure"*). Esse procedimento determina que a seleção da primeira variável a entrar no modelo é a variável X (variável independente) mais correlacionada com a resposta Y (variável dependente) e, posteriormente, por meio dos maiores coeficientes de determinação parcial de todas as variáveis não incluídas no modelo. Ajusta-se o modelo incluindo a última variável selecionada e determinam-se os testes F parciais. Por esse procedimento, qualquer variável que originar uma contribuição não-significativa (F parcial) é removida do modelo. Esse processo continua até que nenhuma outra variável seja admitida no modelo e nenhuma outra seja retirada (LAVORANTI, 2005).

Para avaliar os modelos, foi utilizado o coeficiente de determinação de ajustado ($R^2_{aj.}$) e análise gráfica dos resíduos. A análise gráfica dos resíduos foi aplicada como forma de visualizar os desvios entre os valores reais e os valores estimados e identificar se existem tendências na distribuição dos resíduos da equação. A homogeneidade da variância, a normalidade e a independência dos

resíduos foram verificadas por meio dos testes de Breush-Pagan, Shapiro-Wilk e Durbin-Watson, respectivamente, todos ao nível de 5% de probabilidade.

4.5 ESPACIALIZAÇÃO DO ÍNDICE DE SÍTIO

O objetivo dessa análise é a obtenção de mapas que espacializem o comportamento da variável de interesse (IS_7) na área em estudo, por meio de predições em locais não amostrados. A análise geoestatística dos dados foram realizadas em ambiente SIG, por meio do *software* ArcGis Desktop®, versão 10.4. Havendo significativo grau de correlação entre as variáveis de posicionamento, granulométricas e químicas com o Índice de Sítio dentro do domínio espacial, a estimativa do Índice de Sítio será realizada pelo método da Co-krigagem multivariada, utilizando-se, para isto, o método de interpolação de dados por Co-Krigagem Ordinária. As variáveis utilizadas nesse caso são as que se destacaram nas análises estatísticas multivariadas obtidas pelas Análises de Componentes Principais. Caso não haja correlação significativa entre as variáveis independentes com o Índice de Sítio, a estimativa do IS_7 se dará pelo método de dados por Krigagem ordinária, utilizando apenas os dados da variável de interesse para interpolação.

Os dados foram submetidos ao ajuste do semivariograma, possibilitando a análise do grau de dependência espacial dos dados amostrados. O ajuste do semivariograma foi realizado com base na pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca (VIEIRA, 2000). Para o ajuste do semivariograma, há vários modelos, os quais devem fornecer soluções estáveis para o estimador linear (krigagem). Os modelos testados neste estudo para o ajuste do semivariograma estão descritos na Tabela 3.

TABELA 3. MODELOS TESTADOS PARA AJUSTE DO SEMIVARIOGRAMA

	Equação	Modelo
1	$y(h)=C_0+C_1 \left[1-\exp \left(-3 \frac{h}{a} \right) \right], 0<h<d$	Exponencial
2	$y(h)=C_0+C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h^3}{a^3} \right) \right], 0<h<a;$ $y(h)=C_0+C_1, h \geq a$	Esférico
3	$y(h)=C_0+C_1 \left[1-\exp \left(-\frac{h^2}{a} \right) \right], 0<h<d$	Gaussiano

FONTE: O autor (2018).

Em que: d = máxima distância na qual o semivariograma é definido; a = alcance; C_0 = efeito pepita; $C_0 + C_1$ = patamar.

Após o ajuste do semivariograma foi possível realizar o cálculo da dependência espacial dos dados (equação 26).

$$DE(\%) = \frac{C_1 * 100}{(C_1 + C_0)} \quad (26)$$

Utilizou-se os intervalos propostos por Cambardela et al. (1994) para avaliar o grau de dependência espacial, são eles: dependência espacial forte ($DE > 75\%$), moderada ($25\% < DE < 75\%$) e fraca ($DE < 25\%$). Havendo dependência espacial entre os dados, utilizar-se-á então o método de interpolação (krigagem ordinária ou co-krigagem ordinária) para estimar valores em locais não amostrados.

4.6 GRUPOS HOMOGÊNEOS DE PARCELAS DE INVENTÁRIO FLORESTAL

No presente estudo foram utilizados os métodos de agrupamentos hierárquicos para agrupar as variáveis obtidas nas parcelas de inventário florestal: \overline{DAP} , \overline{HT} , \overline{HDOM} , $\overline{IS_7}$, \overline{V} e \overline{G} . Barroso e Artes (2003) recomendam que se utilize mais de um método de agrupamento sobre um mesmo conjunto de dados para avaliar a melhor combinação entre o método de agrupamento e a melhor medida de

dissimilaridade. Diante disso, o presente trabalho combinou diferentes medidas de dissimilaridade (distância Euclidiana, maximum, Manhattan, Canberra, Binary e Minkowski) com diferentes métodos de agrupamentos hierárquicos:

- ✓ **Ward Method:** A partição desejada é aquela que produz grupos os mais heterogêneos possíveis e de forma que os elementos dentro de cada grupo sejam homogêneos (MINGOTTI, 2005). Ou seja, com exceção do método do centroide, quando se passa do estágio K para o estágio k+1 no algoritmo de agrupamento, a qualidade da partição decresce, o nível de fusão aumenta, logo o nível de similaridade decresce. Isso reflete na diminuição da variação entre grupos e aumento da variação dentro dos grupos. Ward (1963) propôs um método de agrupamento que é fundamentado justamente nessa mudança de variação entre os grupos e dentro dos grupos que estão sendo formados em cada passo do agrupamento. O procedimento é chamado de “Mínima Variância” e fundamentam-se nos seguintes princípios: a) inicialmente, cada elemento é considerado como um único conglomerado; b) em cada passo do algoritmo de agrupamento calcula-se a soma de quadrados dentro de cada conglomerado. Essa soma é o quadrado da distância Euclidiana de cada elemento amostral pertencente ao conglomerado em relação ao correspondente vetor de médias do conglomerado, isto é (equação 27):

$$SS_i = \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)' (X_{ij} - \bar{X}_i) \quad (27)$$

Em que, n_i é o número de elementos no conglomerado C_i quando se está no passo k do processo de agrupamento; X_{ij} , é o vetor de observações do j-ésimo elemento amostral que pertence ao i-ésimo conglomerado; \bar{X}_i é o centróide do conglomerado C_i ; e SS_i representa a soma de quadrados correspondente ao conglomerado C_i . No passo k, a soma de quadrados total dentro dos grupos é definida como (equação 28):

$$SSR = \sum_{i=1}^{g_k} SS_i \quad (28)$$

Em que g_k é o número de grupos existentes quando se está no passo k . A distância entre os conglomerados C_l e C_i é, então, definida como (equação 29):

$$d(C_l, C_i) = \left[\frac{n_l n_i}{n_l + n_i} \right] (\bar{X}_l - \bar{X}_i)' (\bar{X}_l - \bar{X}_i) \quad (29)$$

que é a soma de quadrados entre os clusters C_l , C_i . Em cada passo do algoritmo de agrupamento, os dois conglomerados que minimizam a distância são combinados.

- ✓ **Single Linkage Method:** Nesse método, a similaridade entre dois conglomerados é definida pelos dois elementos mais parecidos entre si (SNEATH, 1957). Supondo que num determinado estágio do algoritmo de agrupamento se tenham dois grupos, um primeiro contendo os elementos amostrais 1, 2 e 3 e o segundo contendo os elementos 4 e 5, isto é:

$$C_1 = \{X_1, X_2, X_3\} \text{ e } C_2 = \{X_4, X_5\}$$

Então, a distância entre esses dois grupos será definida por (equação 30):

$$d(C_1, C_2) = \min\{d(X_l, X_k), l \neq k, l = 1, 2, 3 \text{ e } k = 4, 5\} \quad (30)$$

- ✓ **Average Linkage Method:** Esse método trata a distância entre dois conglomerados como a média das distâncias entre todos os pares de elementos que podem ser formados com os elementos dos dois conglomerados, que estão sendo comparados. Portanto, se o conglomerado C_1 tem n_1 elementos e o conglomerado C_2 tem n_2 elementos, a distância entre eles será definida por (equação 31):

$$d(C_1, C_2) = \sum_{l \in C_1} \sum_{k \in C_2} \left(\frac{1}{n_1 n_2} \right) d(X_l, X_k) \quad (31)$$

✓ **Centroid Method:** Esse método define as coordenadas de cada grupo como sendo a média das coordenadas de seus objetos. Uma vez obtidas essas coordenadas, denominadas centróides ou vetores de médias, dos grupos que estão sendo comparados, a distância entre dois grupos é obtida através do cálculo das distâncias entre os centróides (MINGOTI, 2005; BARROSO; ARTES, 2003). O método do centróide também pode ser usado com a distância Euclidiana usual entre os vetores de médias. Em cada passo do algoritmo do agrupamento, os conglomerados que apresentam o menor valor de distância são agrupados. Assim, se:

$$C_1 = \{X_1, X_2, X_3\} \text{ e } C_2 = \{X_4, X_5\}$$

Então, os vetores de médias correspondentes são (equações 32 e 33):

$$C_1 = \bar{X}_1 = \frac{1}{3} [X_1 + X_2 + X_3] \quad (32)$$

$$C_2 = \bar{X}_2 = \frac{1}{2} [X_4 + X_5] \quad (33)$$

A distância entre C_1 e C_2 é definida por (equação 34):

$$d(C_1, C_2) = (\bar{X}_1 - \bar{X}_2)'(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) \quad (34)$$

que é a distância Euclidiana ao quadrado entre os vetores de médias amostral \bar{X}_1 e \bar{X}_2 .

A melhor combinação entre distância e método foi avaliada por meio da correlação cofenética, a qual tem por objetivo avaliar o grau de ajuste do agrupamento. A análise de correlação cofenética associada à análise de

agrupamento pode ser utilizada para aumentar a confiabilidade das conclusões frente a interpretação dos dendrogramas. Essa análise mede o grau de ajuste entre a matriz de similaridade original e a matriz resultante da simplificação proporcionada pelo método de agrupamento. A correlação cofenética equivale à correlação de Pearson entre a matriz de similaridade original e aquela obtida após a construção do dendrograma. Assim, quanto mais próxima de 1, menor a distorção provocada pelo agrupamento das parcelas. Desse modo, foi possível reunir as Parcelas de Inventário Florestal em grupos homogêneos.

4.7 ESPACIALIZAÇÃO DAS MEDIDAS DE VARIABILIDADE

4.7.1 Medidas de variabilidade das parcelas

Para avaliar a variabilidade dos dados da parcela com respeito à média, foram investigados os desvios padrões das variáveis dap (desvDAP), ht (desvHT), g (desvg), V (desvVOL) e o índice de uniformidade PV50 do plantio. O PV50 trata-se da porcentagem de volume acumulado das 50% menores árvores do seu conjunto de dados, considerando as árvores mortas e as falhas de plantio (HAKAMADA et al., 2015). A expressão do PV50 pode ser observada na equação 35.

$$PV50 = \frac{\sum_{k=1}^n V_{ij}}{\sum_{k=1}^n V_{ij}} \quad (35)$$

Em que: PV50 = porcentagem acumulada do volume das 50% menores árvores plantadas; V = volume da árvore i; e n = número de árvores plantadas ordenadas (da menor para a maior).

As medidas de variabilidade foram utilizadas para caracterizar os valores das variáveis, ressaltando a variabilidade entre esses valores e sua medida de posição, permitindo verificar se o conjunto de dados é homogêneo ou heterogêneo.

4.7.2 Análise Discriminante

As medidas de variabilidade (desvDAP, desvHT, desvg, desvVOL e PV50) foram submetidas à análise discriminante. Por meio dessa análise foi possível identificar qual ou quais variáveis do meio físico foram as mais importantes para a construção da função de discriminação das medidas de variabilidade. Inicialmente, essas medidas foram divididas em grupos, ou classes, de acordo com suas amplitudes, e então foi aplicada a análise para a classificação do conjunto de dados. Esse procedimento foi aplicado para desenvolver um conjunto de funções discriminantes que podem ajudar a prever o valor das medidas de variabilidade com base nos valores das variáveis do meio físico. Portanto, as variáveis do meio físico foram utilizadas para desenvolver um modelo para discriminar os diferentes níveis das medidas de variabilidade.

O método utilizado para a identificação das variáveis mais importantes para a construção da função de discriminação foi o método *Backward*. Esse método se iniciou considerando todas as variáveis candidatas à discriminação como parte de um único modelo de regressão. O método testou a significância de cada variável independente, eliminando as variáveis não significativas, ou seja, aquelas de menor significância, e, conseqüentemente, de menor poder de discriminação. A decisão sobre a eliminação ou não da variável foi feita a partir do ajuste de um modelo ANCOVA, no qual cada variável é tratada como a variável dependente e as (p-1) variáveis restantes como independentes.

A estatística F foi calculada para cada variável e, se o valor F observado se apresentar menor que o valor F de referência escolhido para a saída de variáveis (nesse estudo foi utilizado um nível de significância de 5%), a variável será candidata a sair. A cada passo do processo saiu a variável de menor significância. Em caso da variável ser removida, o procedimento *backward* prossegue buscando uma segunda variável para remoção, o que é feito novamente através do ajuste de um modelo ANCOVA para cada uma das (p-1) variáveis separadamente, considerando-a como variável dependente em função das (p-2) variáveis restantes. Este procedimento é repetido até que não haja mais variáveis para serem removidas do modelo. Ao final da análise, foi possível verificar a porcentagem de classificação correta.

4.7.3 Espacialização das medidas de variabilidade

A partir da análise discriminante, as medidas de variabilidade e as variáveis do meio físico que apresentaram maior significância na modelagem da função discriminante foram submetidas à análise espacial, por meio da krigagem ordinária. Dessa forma, foi possível obter mapas da espacialização do comportamento dessas novas variáveis de interesse na área em estudo, por meio de predições em locais não amostrados.

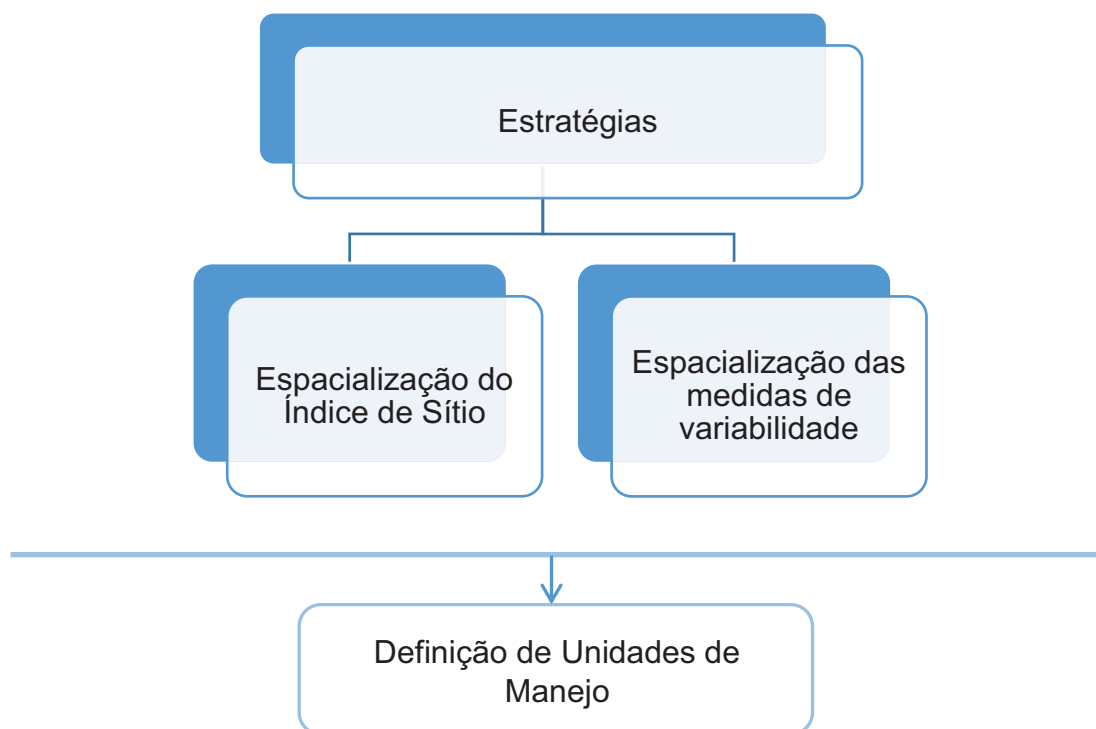
Os dados foram submetidos ao ajuste do semivariograma, possibilitando a análise do grau de dependência espacial dos dados amostrados. O ajuste do semivariograma foi realizado com base na pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca (VIEIRA, 2000). Para o ajuste do semivariograma foram testados os mesmos modelos descritos no item 4.5 (Tabela 3). Para avaliar o grau de dependência espacial das variáveis, utilizou-se os intervalos propostos por Cambardela et al. (1994) e descritos no item 4.5. Havendo dependência espacial entre os dados, utilizar-se-á então o método de interpolação por meio da krigagem ordinária para estimar valores em locais não amostrados.

Após a interpolação dos dados, as medidas de variabilidade espacializadas e as variáveis do meio físico que se destacaram na análise discriminante, essas também espacializadas, foram submetidas à análise de correlação espacial, através da ferramenta *Band Collection Statistics*, do software ArcGis Desktop®, versão 10.4, permitindo avaliar o grau de correlação entre elas.

4.8 UNIDADES DE MANEJO PARA ACÁCIA-NEGRA

Com a espacialização das variáveis de interesse foi possível estratificar o povoamento florestal e obter unidades de área indivisíveis em termos de potencial produtivo, sendo o reflexo da interação das variáveis do meio físico que afetam a produtividade local. Para isso, as espacializações do Índice de Sítio e das medidas de variabilidade supracitadas foram utilizadas como diferentes estratégias para definição das Unidades de Manejo (Figura 5). Assim, a proposta de Unidades de Manejo foi realizada com base nos melhores resultados.

FIGURA 5. ESTRATÉGIAS PARA DEFINIÇÃO DE UNIDADES DE MANEJO



FONTE: O autor (2018).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 INVENTÁRIO FLORESTAL

5.1.1 Estatísticas descritivas do inventário florestal

Preliminarmente, foram realizadas as análises estatísticas descritivas para o conjunto de variáveis obtidas das parcelas de inventário florestal, provenientes de plantios comerciais de acácia negra em três diferentes idades. As estatísticas obtidas para todos os valores mensurados são apresentados na Tabela 4. A média encontrada para ht foi de 15,92 m, com um intervalo de confiança variando de 15,78 a 16,07 m. O coeficiente de variação foi de 23,13 %, para uma amplitude de 2,10 a 25,00 m e desvio padrão de 3,68 m. A média encontrada para o dap foi de 12,75 cm, para com um intervalo de confiança de 12,57 a 12,93 cm, e coeficiente de variação de 34,86% para uma amplitude de 1,91 a 28,01 cm. O desvio padrão foi de 4,45 cm. A média para a variável v foi de 0,131 m³, com intervalo de confiança entre 0,122 e 0,140 m³. O coeficiente de variação foi de 59,184 %, para uma amplitude entre 0,026 e 0,354 m³. O desvio padrão foi de 0,077 m³.

TABELA 4. ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA HT E DAP, EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL

Estatística	ht (m)	dap (cm)	v (m ³)
Média	15,92	12,75	0,131
Mediana	16,60	12,41	0,123
Moda	17,50	10,35	0,026
Variância (m ² ou cm ²)	13,57	19,77	0,006
Desvio Padrão	3,68	4,45	0,077
Erro Padrão	0,08	0,09	0,005
CV (%)	23,13	34,86	59,184
Mínimo	2,10	1,91	0,026
Máximo	25,00	28,01	0,354
Intervalo de confiança ($\alpha=0,05$)	$15,78 \leq x \leq 16,07$	$12,57 \leq x \leq 12,93$	$0,122 \leq x \leq 0,140$

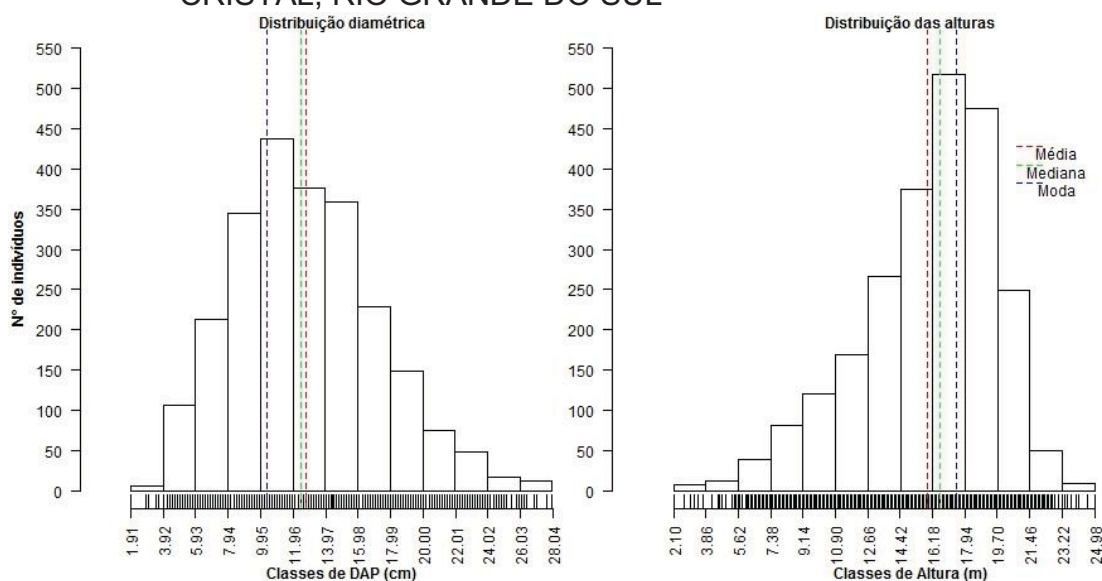
FONTE: O autor (2018).

Em que: ht (m) = altura total em metros; dap (cm) = diâmetro à altura do peito em centímetros; v (m³) = volume em metros cúbicos; CV (%) = coeficiente de variação em porcentagem.

Na Figura 6 é possível verificar a distribuição da frequência observada (em números de indivíduos) em relação às classes de dap e ht. Observa-se que as frequências apresentam distribuição unimodal em ambos os casos, com índice de assimetria de 0,45 para o dap, indicando uma assimetria positiva, à direita, e moderada. Já para ht o índice de assimetria foi de -0,74, indicando uma assimetria negativa, à esquerda, e moderada. O índice de curtose para o dap foi de -0,007, apresentando, assim, uma forma leptocúrtica, já o índice de curtose para ht foi de 0,338, caracterizando uma forma platicúrtica.

Finger (1982), estudando a distribuição diamétrica da acácia negra em povoamentos com idades de 4,5; 5,5; 6,5 e 7,5 anos, notou uma distribuição assimétrica à direita, positiva, corroborando com a distribuição diamétrica encontrada no presente trabalho. Em contraste, Sanquetta et al. (2014), estudando a relação hipsométrica em povoamentos de acácia negra aos 7 anos de idade, evidenciaram uma distribuição assimétrica à esquerda, negativa, tanto para ht quanto para o dap. A divergência quanto à distribuição diamétrica em relação ao presente trabalho provavelmente tenha ocorrido uma vez que os povoamentos trabalhados por esses autores tenham passado por melhoramento genético, de forma a acentuar as frequências das árvores com diâmetros maiores. No tocante ao achatamento da curva, esses mesmos autores encontraram uma distribuição diamétrica leptocúrtica e distribuição de alturas platicúrtica, o mesmo foi encontrado neste estudo.

FIGURA 6. DISTRIBUIÇÃO DAS FREQUÊNCIAS OBSERVADAS EM CLASSES DE DAP E HT MENSURADOS EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL



FONTE: O autor (2018).

Para o dap, as maiores frequências ocorreram entre os centros de classe 10,95 e 14,96 cm, que juntas, representaram cerca de 49,4 % das frequências dos indivíduos. Para ht, as maiores frequências ocorreram entre os centros de classe 14,31 e 18,84 m, representando aproximadamente 57,6 % das frequências.

5.1.2 Relação hipsométrica

5.1.2.1 Análise de correlação entre as variáveis ht e dap

Efetuuou-se análise de correlação linear simples entre as variáveis envolvidas na modelagem, considerando um nível de significância de 95%. A análise de correlação da ht com o dap, em sua forma natural ou transformada, foi significativa para todos os casos (Tabela 5). Nota-se que a transformação da variável dap para o seu inverso e logarítmica resultou uma melhora na relação com ht. Todas as correlações apresentaram intensidade forte ($0,6 \leq 0,9$) com ht, o mesmo foi observado no trabalho de Sanquetta et al. (2014). Ainda assim, foram observados alguns pontos dispersos da tendência central da massa de dados (Figura 7). Nesta mesma figura é possível observar a linha de tendência entre as variáveis.

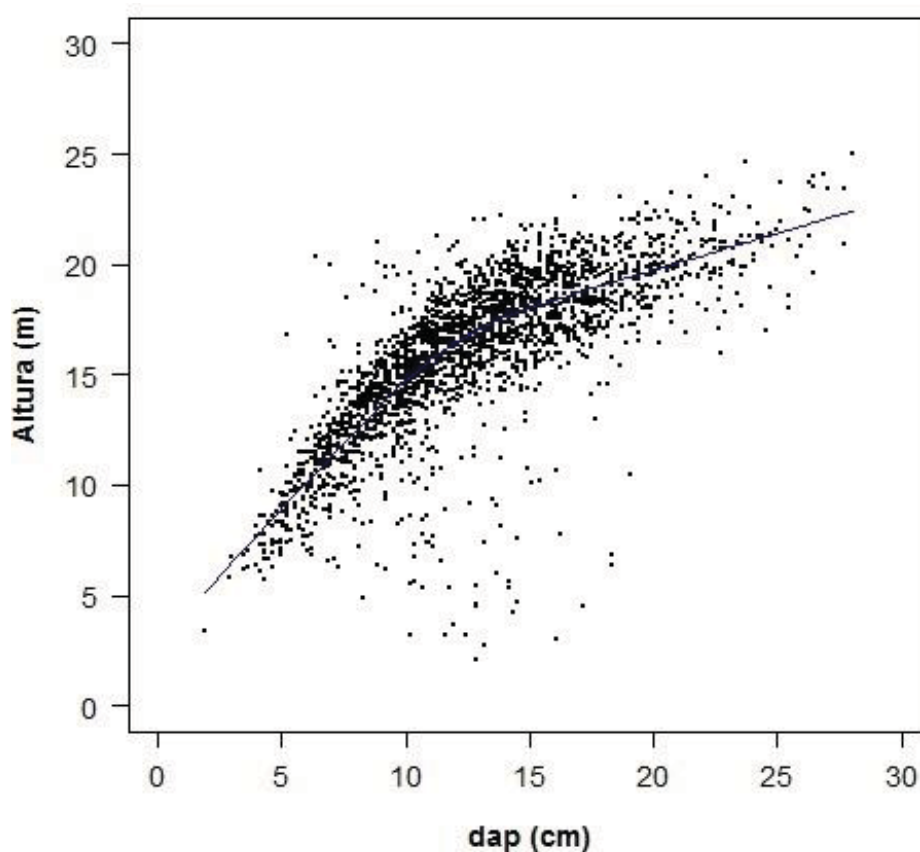
TABELA 5. CORRELAÇÃO ENTRE HT E O DAP, EM SUA FORMA NATURAL E TRANSFORMADA

	ht	dap	dap ²	dap ³	log(dap)	log(dap ²)	1/dap	1/dap ²
ht	1							
dap	0,76*	1						
dap ²	0,69*	0,98	1					
dap ³	0,62*	0,92	0,98	1				
log(dap)	0,79*	0,97	0,90	0,81	1			
log(dap ²)	0,79*	0,97	0,90	0,81	1	1		
1/dap	-0,77*	-0,87	-0,76	-0,66	-0,96	-0,96	1	
1/dap ²	-0,64*	-0,67	-0,55	-0,45	-0,80	-0,80	0,93	1

FONTE: O autor (2018).

Em que: * = significativo ao nível de 95% de significância; log = logaritmo na base 10.

FIGURA 7. DISPERSÃO ENTRE A HT E O DAP DE ÁRVORES MENSURADAS EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL



FONTE: O autor (2018).

5.1.2.2 Ajuste de modelos hipsométricos

Na Tabela 6 são apresentadas as estatísticas de ajuste dos modelos testados. Todas as equações apresentaram valores significativos de F, indicando que as mesmas podem explicar a variabilidade da ht em função do dap. Nota-se que, em geral, os modelos ajustados apresentaram boas estatísticas de precisão, com coeficiente de determinação variando entre 0,475 e 0,633 e erro padrão da estimativa oscilando entre 13,75 e 16,53%. A equação M7 apresentou vantagem em relação às demais para a estimativa da altura, esta equação obteve o maior coeficiente de determinação ajustado (0,637), menor erro padrão da estimativa (13,75%) e o menor valor do critério de informação de Akaike (2609,20). No entanto, a equação M7, assim como as equações M3 e M12, apresentaram VIF (Valor de Inflação da Variância) maior que 10, indicando que são equações que possuem problemas de multicolinearidade, podendo gerar impactos na estimativa dos parâmetros. Portanto, estas equações não foram selecionadas.

Ainda na Tabela 6 é possível verificar as 6 melhores equações matemáticas selecionadas para representar a relação hipsométrica das árvores (M1, M5, M8, M10, M13 e M15). Observa-se que as equações selecionadas apresentaram um coeficiente de determinação ajustado variando entre 0,631 e 0,635, demonstrando que a variação total dos dados foi bem explicada por todas as equações, as equações também apresentaram erro padrão da estimativa oscilando entre 13,87 e 13,75% e critério de informação de Akaike variando entre 2631,00 e 2609,20. Desse modo, a distribuição gráfica dos resíduos é apresentada para as 6 equações selecionadas (Figura 8), as demais distribuições de resíduos podem ser visualizadas em Apêndice 1.

TABELA 6. ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DE MODELOS HIPSONÔMETRICOS TESTADOS

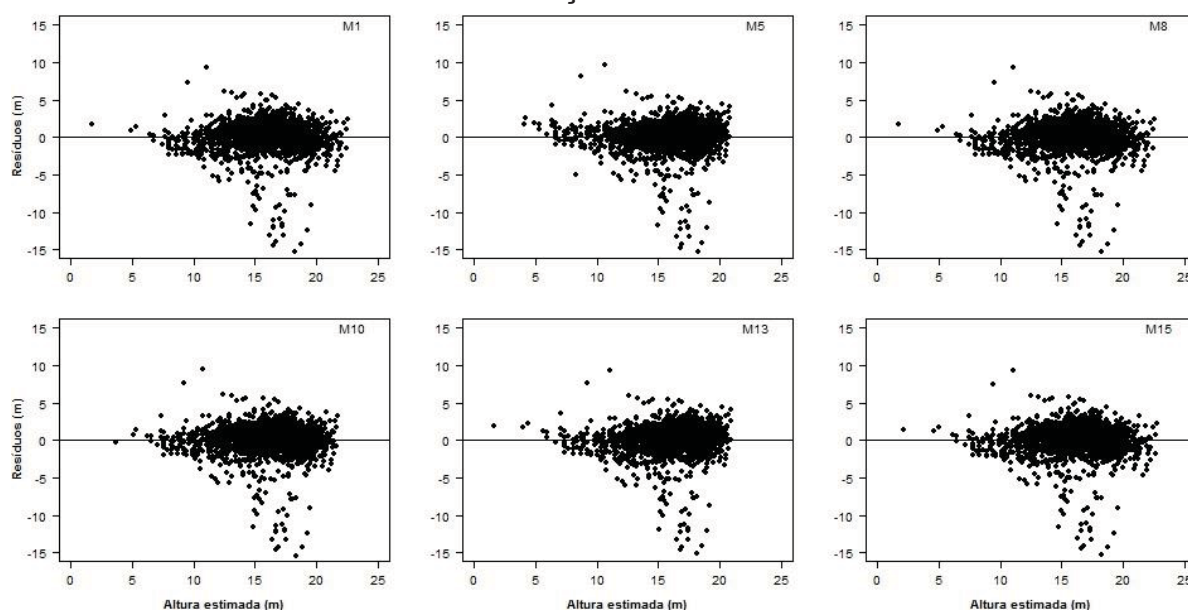
Equação	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2	R^2_{Ajustado}	S_{yx}	$S_{yx}(\%)$	AIC
M1	-3,27000	7,74000	---	---	0,632	0,632	2,21	13,85	2630,69
M2	12,29800	0,01990	---	---	0,475	0,475	2,63	16,53	3219,16
M3	2,65880	1,49550	-0,03180	---	0,628	0,628	2,22	13,92	2649,51
M4	22,40000	-71,30000	---	---	0,592	0,592	2,32	14,58	2801,28
M5	24,70000	-114,90000	159,60000	---	0,633	0,633	2,20	13,83	2626,45
M6	8,05600	0,61700	---	---	0,573	0,573	2,38	14,92	2877,46
M7	-1,88802	2,66211	-0,21061	0,00204	0,637	0,637	2,19	13,75	2609,20
M8	-3,27000	3,87000	---	---	0,631	0,631	2,22	13,87	2631,00
M9	2,19520	0,04230	---	---	0,495	0,495	2,58	16,21	3154,29
M10	3,30000	-6,88000	5,82000	---	0,636	0,635	2,20	13,78	2615,17
M11	1,37400	0,27400	---	---	0,600	0,600	2,30	14,44	2768,94
M12	1,69572	0,12355	-0,00294	---	0,607	0,607	2,28	14,31	2740,63
M13	3,21000	-5,28000	---	---	0,634	0,634	2,20	13,81	2622,06
M14	1,37400	0,54800	---	---	0,600	0,600	2,30	14,44	2768,94
M15	3,02136	-4,42514	---	---	0,633	0,633	2,20	13,83	2628,41

FONTE: O autor (2018).

Em que: β_n = coeficientes do modelo; R^2_{Ajustado} = coeficiente de determinação ajustado; $S_{yx}(\%)$ = erro do padrão da estimativa em porcentagem; AIC = critério de informação de Akaike.

Na Figura 8, podem ser observados os resíduos da relação entre a altura observada e a altura estimada, em função da altura estimada para as 6 melhores equações destacadas na tabela 6. Observa-se, por meio da análise gráfica dos resíduos, que todas as equações apresentaram tendência de superestimar a altura de alguma das árvores com diâmetros entre 10 e 20 centímetros. Ao avaliar as condicionantes da regressão, constatou-se que as seis equações selecionadas apresentaram-se heterocedásticas ao aplicar o teste de Breusch-Pagan, ou seja, a variância dos erros foi homogênea para as diferentes observações. A frequência dos resíduos não seguiu uma distribuição normal de acordo com o teste de Shapiro-Wilk, corroborando com a interpretação visual do gráfico de resíduos. Ademais, os resíduos apresentaram correlação em série, segundo o teste de Durbin-Watson, isto é, os resíduos não são independentes.

FIGURA 8. DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS OBTIDOS A PARTIR DAS 6 MELHORES EQUAÇÕES MATEMÁTICAS EMPREGADAS PARA DESCREVER A RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA



FONTE: O autor (2018).

Para corrigir os efeitos de não normalidade e dependência dos resíduos, foi medida a influência de cada observação sobre todos os valores ajustados por meio da Distância de Cook, aplicada a cada um dos seis melhores modelos ajustados. Após a identificação dos valores influentes, esses foram excluídos, ocasionando uma mudança substancial na análise de regressão, tanto nos valores ajustados quanto nas estimativas dos coeficientes. Na Tabela 7 é possível observar a mudança considerável nas estatísticas de precisão dos modelos ajustados após a exclusão dos valores influentes. Em geral, todas as equações obtiveram melhoras substanciais em suas estatísticas de precisão, exceto para a equação M5, que não houve melhorias significativas em seu ajuste. O coeficiente de determinação dessas equações oscilou entre 0,659 e 0,803, o erro padrão da estimativa entre 8,32 % e 13,09 e critério de informação de Akaike entre 923,07 e 2440,44. As equações M5 e M10, dessa vez, foram as equações que apresentaram VIF acima de 10 e, por consequência, não foram selecionadas.

As estatísticas apresentadas na Tabela 7 permitem selecionar a equação M1 como a melhor para descrever a relação altura-diâmetro, com o maior coeficiente de determinação ajustado (0,803), menor erro padrão da estimativa (8,32%) e menor valor do critério de informação de Akaike (923,07). Do mesmo modo, a equação M8

revelou o segundo melhor desempenho, configurado pelas estatísticas do coeficiente de determinação ajustado (0,801), erro padrão da estimativa (8,34%) e critério de informação de Akaike (924,00). Em todas as equações, todos os coeficientes da regressão foram significativos.

TABELA 7. ESTATÍSTICAS DE AJUSTE PARA OS 6 MELHORES MODELOS HIPSONOMÉTRICOS, APÓS EXCLUSÃO DOS VALORES INFLUENTES

Equação	β_0	β_1	β_2	R^2	R^2_{Ajustado}	S_{yx}	$S_{yx}(\%)$	AIC
M1	-3,020000	7,750000	---	0,803	0,803	1,36	8,32	923,07
M5	25,700000	-133,000000	231,800000	0,659	0,659	2,09	13,09	2440,44
M8	-3,020000	3,870000	---	0,801	0,801	1,38	8,34	924,00
M10	3,280000	-5,970000	1,380000	0,766	0,766	1,53	9,39	1354,14
M13	3,270000	-5,680000	---	0,763	0,763	1,57	9,61	1429,85
M15	3,245541	-5,569691	0,000941	0,763	0,762	1,57	9,62	1432,84

FONTE: O autor (2018).

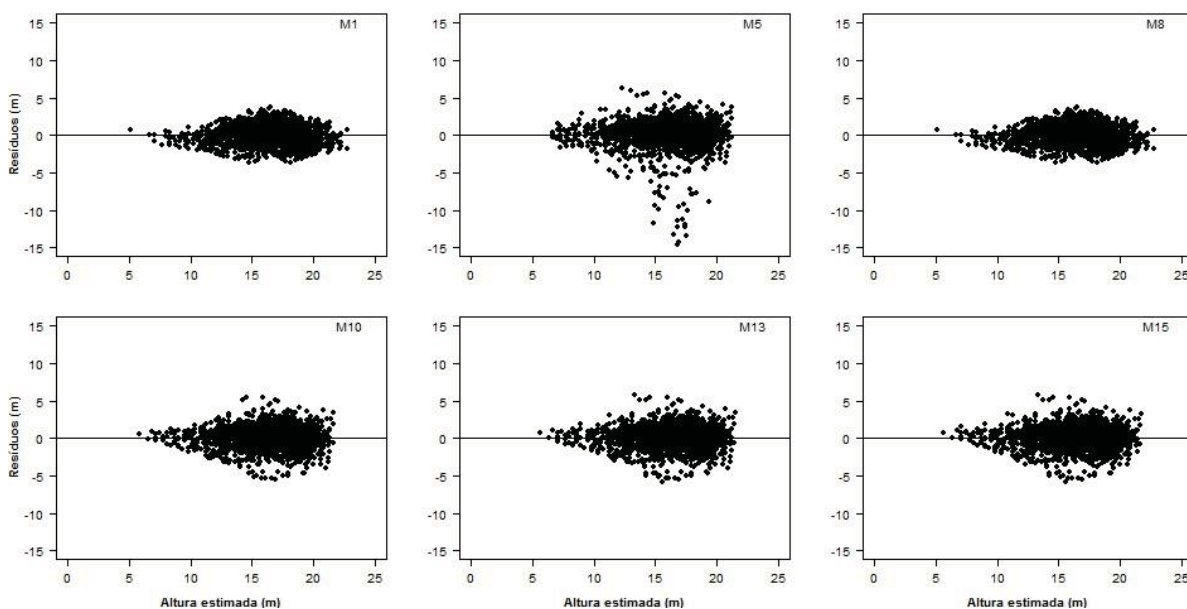
A homogeneidade da variância foi observada em todas as equações, exceto para o modelo M5, segundo o teste de Breusch-Pagan. Na Figura 9 são apresentadas as distribuições de resíduos para os 6 modelos hipsométricos ajustados após a exclusão dos valores influentes. Para todas as equações, exceto para a equação M5, a distribuição dos resíduos apresentaram normalidade, segundo o teste de Shapiro-Wilk, e mostraram-se independentes, segundo o teste de Durbin-Watson, garantindo a precisão das estimativas. A equação M1 apresentou a melhor distribuição de resíduos, sem tendências nítidas de subestimar ou superestimar as alturas dentro da amplitude de diâmetros observados. Assim sendo, conclui-se que a equação M1 apresenta maior precisão para estimar a altura total em função do diâmetro das árvores, sendo ela indicada para os plantios comerciais de acácia negra considerados neste estudo.

Sanquetta et al. (2014) identificaram que as três equações com melhor desempenho para estimativa da altura das árvores de acácia negra foram as logarítmicas, o mesmo foi observado no trabalho de Saidelles et al. (2009), em que as equações logarítmicas foram superiores quanto ao desempenho, quando confrontadas com as aritméticas. Entretanto, no presente estudo, embora as equações logarítmicas tenham apresentado um desempenho muito semelhante ao desempenho das equações aritméticas, as aritméticas demonstraram-se mais

flexíveis, ou seja, conseguiram explicar melhor a variabilidade da altura em função do diâmetro à altura do peito. O mesmo foi encontrado no trabalho de Barichello, Schumacher e Munari (2005), em que esses autores selecionaram um modelo aritmético como sendo o melhor para a predição da altura, em povoamentos de acácia negra, aos oito anos de idade.

Finger et al. (2000), estudando a relação altura-diâmetro de acácia negra em três diferentes regiões do Rio Grande do Sul, em povoamentos com idades de oito, nove e dez anos, selecionaram o modelo de Prodan ($ht=1,3 + \{dap^2/(b_0+b_1dap+b_2dap^2)\}^2$) para estimar a altura total em todas as regiões de estudo. Por sua vez, Caldeira et al. (2002), analisando diferentes modelos matemáticos para estimar a altura das árvores em função do dap e idade, em povoamentos de acácia negra, na região Sudeste do Estado do Rio Grande do Sul, chegaram a conclusão de que o modelo estimado em função do dap e da idade das árvores resultou como modelo mais eficiente para ajustar as alturas em povoamentos com idades de 2, 4, 6 e 8 anos.

FIGURA 9. DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA OS 6 MELHORES MODELOS HIPSOMÉTRICOS, APÓS EXCLUSÃO DOS VALORES INFLUENTES



FONTE: O autor (2018).

5.1.3 Relação do volume

5.1.3.1 Análise de correlação entre o volume e as variáveis dap e ht

Para a modelagem do volume individual das árvores, realizou-se preliminarmente, a análise de correlação linear simples entre as variáveis, considerando um nível de significância de 95 %. A análise de correlação entre o volume e as variáveis dap e ht em suas formas naturais ou transformadas foram significativas para todos os casos (Tabela 8). Nota-se ainda que todas as correlações apresentaram forte intensidade, com coeficientes de correlação de Pearson superiores a 0,8.

TABELA 8. CORRELAÇÃO ENTRE VOLUME, DAP E HT, EM SUAS FORMAS NATURAIS E TRANSFORMADAS

	V	logv	dap	ht	logdap	loght	dap ² ht
v	1						
logv	0,95	1					
dap	0,97*	0,97*	1				
ht	0,87*	0,92*	0,85	1			
logdap	0,95*	0,99*	0,99	0,87	1		
loght	0,85*	0,92*	0,84	0,99	0,87	1	
dap ² ht	0,99*	0,94*	0,98	0,86	0,95	0,84	1

FONTE: O autor (2018).

Em que: * = significativo ao nível de 95% de significância; v = volume total individual; log = logaritmo na base 10.

5.1.3.2 Ajuste de modelos volumétricos

Na Tabela 9 são apresentadas as estatísticas de ajuste dos modelos volumétricos testados. Todos os modelos ajustados apresentaram valores significativos de F, indicando que os mesmos podem explicar a variabilidade do volume em função das variáveis dap e ht. Em geral, todas as equações apresentaram boas estatísticas de precisão, com coeficiente de determinação ajustado entre 0,947 e 0,975 e erro padrão da estimativa entre 9,29 e 13,64%. Todas as equações apresentaram VIF menor que 10, indicando que são equações que não possuem problemas de multicolinearidade. Portanto, todas as equações se

apresentaram eficientes para a estimativa do volume. Em todas as equações, todos os coeficientes da regressão foram significativos. A distribuição dos resíduos para todas as equações são apresentadas na Figura 10.

Nota-se, por meio da análise gráfica dos resíduos, que nenhuma das equações apresentou tendências em super ou subestimar o volume das árvores. Ao avaliar as condicionantes da regressão para as 3 equações, constatou-se que as equações apresentaram-se homocedásticas ao aplicar o teste de Breush-Pagan, a frequência dos resíduos seguiu distribuição normal de acordo com o teste de Shapiro-Wilk, corroborando com a interpretação visual do gráfico. Os resíduos não apresentaram correlação em série, segundo o teste de Durbin-Watson, ou seja, os resíduos são independentes. No entanto, o modelo de Schumacher-Hall apresentou ligeira vantagem em relação aos demais para a estimativa do volume, com coeficiente de determinação ajustado de 0,975, menor erro padrão da estimativa (9,29 %) e menor valor do critério de informação de Akaike (-2387,72), permitindo, portanto, selecionar o modelo de Schumacher-Hall como o melhor para descrever a relação do volume com as variáveis dap e ht .

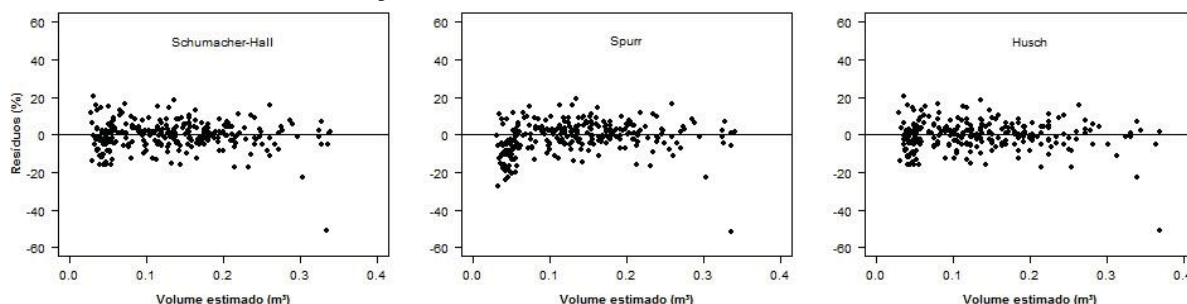
TABELA 9. ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DE MODELOS VOLUMÉTRICOS TESTADOS

Equação	β_0	β_1	β_2	R^2	$R^2_{ajustado}$	S_{yx}	$S_{yx}(\%)$	AIC
Schumacher - Hall	-9,7781	1,8959	0,9826	0,975	0,975	0,01	9,29	-2387,72
Spurr	0,007326	0,00003854		0,975	0,975	0,01	9,45	-2379,73
Husch	-8,266	2,394		0,947	0,947	0,02	13,64	-2180,82

FONTE: O autor (2018).

Em que: β_n = coeficientes do modelo; $R^2_{ajustado}$ = coeficiente de determinação ajustado; $S_{yx}(\%)$ = erro do padrão da estimativa em porcentagem; AIC = critério de informação de Akaike.

FIGURA 10. DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS OBTIDOS A PARTIR DAS EQUAÇÕES MATEMÁTICAS EMPREGADAS PARA DESCREVER A RELAÇÃO VOLUMÉTRICA



FONTE: O autor (2018).

Schneider e Hosokawa (1978), estudando equações volumétricas para estimar volumes com e sem casca para acácia-negra, observaram que a equação $\log V = -4,2007 + 0,9495 \text{ dap}^2 \text{ht}$ foi a que melhor se destacou para estimativa de volumes individuais em povoamentos comerciais no estado do Rio Grande do Sul. Em outro trabalho, Schneider e Tonini (2003), estudando a utilização de variáveis *dummy* em equações de volume para acácia-negra na região da Depressão Central no Rio Grande do Sul, indicaram o modelo de Stoate como o de melhor precisão, em que o ajuste dessa equação com a utilização de variáveis *dummy* se mostrou eficiente, com coeficiente de determinação de 0,97 e erro padrão da estimativa de 7,4 %, permitindo identificar diferenças de crescimento das árvores entre diferentes locais.

5.1.4 Classificação de sítio

Entre as diversas características de um povoamento florestal, a altura dominante é a variável mais utilizada para descrever qualidade de sítio, devido ao fato de ser pouco afetada por variações de densidades e apresentar forte correlação com o crescimento potencial em volume (SCOLFORO, 1998). Os valores médios de *dap*, *ht*, e valores de *HDOM*, *IS_7*, *V* e *G* para cada uma das parcelas de inventário florestal temporárias, procedentes de plantios comerciais de acácia negra podem ser observados no Apêndice 2.

A altura dominante apresentou uma amplitude variando de 17,12 a 22,52 m, com média geral de 19,63 m. O Índice de Sítio aos 7 anos de idade apresentou

média de 19,36 m, com amplitude variando de 16,88 a 22,21 m. Em trabalho similar, Mochiutti (2007) encontrou uma altura dominante média de 16,3 m, com variação de 14,6 a 18,0 m e classificação de sítios com amplitude de 12 a 20 m, em plantios comerciais de acácia negra, aos 5 anos de idade, em 4 municípios do Rio Grande do Sul.

Determinou-se a idade de 7 anos como Idade Índice por estar próxima da idade de rotação e, então, arbitrou-se a divisão em 3 classes de sítio (Tabela 10). Em trabalhos correlatos, Schneider e Silva (1980) realizaram a classificação de sítio para povoamentos de acácia negra, tendo sido definidos cinco classes de sítio, com variação de 12 a 20 metros, para uma idade de referência de 5 anos.

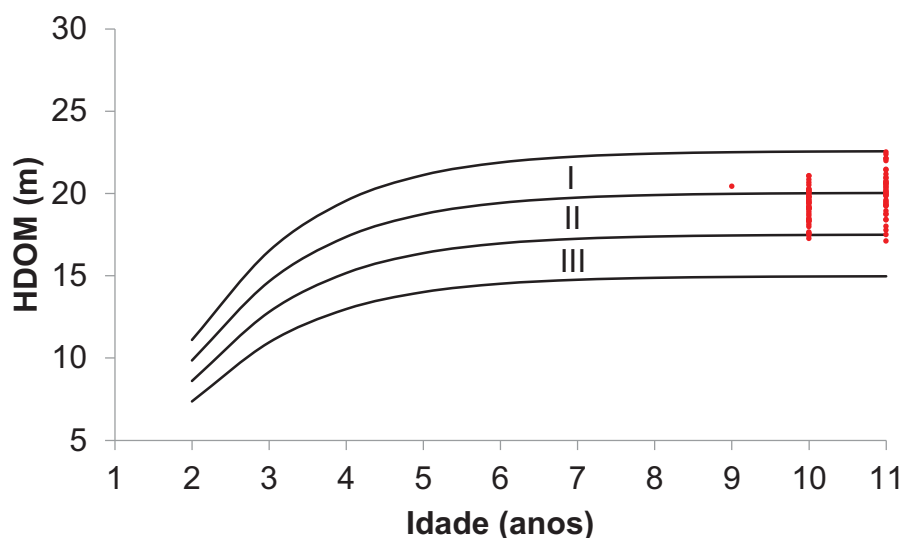
TABELA 10. CLASSES DE ALTURA DOMINANTE, À IDADE ÍNDICE DE 7 ANOS EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL

Classe	Intervalo	Índice de Sítio (m)
III	14,8-17,30	16,0
II	17,31 - 19,8	18,5
I	19,81 - 22,3	21,0

FONTE: O autor (2018).

Por meio da equação de sítio desenvolvida por Maestri (1992), construiu-se graficamente as curvas de cada classe (Figura 11) e, os limites das alturas dominantes médias, estimadas por idade e classe de sítio estão apresentados na Tabela 11. Nota-se que a classe III é pouco representada e há somente uma parcela com idade de nove anos.

FIGURA 11. CURVAS DAS CLASSES DE SÍTIO EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL



FONTE: O autor (2018).

TABELA 11. LIMITES DAS ALTURAS DOMINANTES ESTIMADAS POR IDADE E CLASSE DE SÍTIO EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL

Idades	Classe 1		Classe 2		Classe 3	
	LS	LI	LS	LI	LS	LI
2	11,1	9,9	9,9	8,6	8,6	7,4
3	16,5	14,7	14,7	12,8	12,8	11,0
4	19,6	17,4	17,4	15,2	15,2	13,0
5	21,1	18,8	18,7	16,4	16,4	14,0
6	21,9	19,4	19,4	17,0	17,0	14,5
7	22,3	19,8	19,8	17,3	17,3	14,8
8	22,4	19,9	19,9	17,4	17,4	14,9
9	22,5	20,0	20,0	17,5	17,4	14,9
10	22,5	20,0	20,0	17,5	17,5	15,0
11	22,6	20,0	20,0	17,5	17,5	15,0

FONTE: O autor (2018).

Em que: LI = limite inferior, em metros; LS = limite superior, em metros.

5.2 ANÁLISE DOS ATRIBUTOS DO MEIO FÍSICO

5.2.1 Interpretação dos resultados das análises das variáveis de posicionamento das parcelas

Os dados de altitude e profundidade efetiva do solo para cada parcela podem ser observados no Apêndice 3. A altitude das parcelas de inventário florestal apresentou uma amplitude variando de 37,51 a 163,12 m, com média geral de 90,50 m e desvio padrão de 25,61 m. A profundidade efetiva do solo oscilou entre 40,00 e 60,00 cm, com média geral de 57,58 cm e desvio padrão de 6,56 m. Os solos foram avaliados como pouco profundo (40 a 80 cm), de acordo com a Comissão de Fertilidade do Solo RS/SC (2004). Embora os solos tenham sido caracterizados pouco profundo, durante a descrição do perfil dos solos, não foram detectadas deformações no sistema radicular das árvores. Segundo Costa et al (2002), em solos rasos, algumas raízes pivotantes chegam a crescer na horizontal quando encontram algum tipo de limitação em dado ponto do perfil e quando a pressão é muito alta podem ocorrer injúrias às raízes, causando morte em parte do sistema radicular.

5.2.2 Interpretação dos resultados das análises das variáveis granulométricas

Os resultados para granulometria dos solos das parcelas amostradas, em três profundidades (0 a 20 cm, 20 a 40 cm) estão apresentados no Apêndice 4. De acordo com Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, os solos dos plantios estão classificados em: Franco Argilo Arenoso, Franco Arenoso e Areia Franca.

Na camada superficial (0 a 20 cm) a fração areia apresentou magnitude variando de 59,33 a 79,05% $m.m^{-1}$, com média de 72,70% $m.m^{-1}$, a fração silte apresentou magnitude variando de 7,21 a 24,03% $m.m^{-1}$, com média de 15,17% $m.m^{-1}$, e a fração argila oscilou entre 5,70 e 21,93% $m.m^{-1}$, com média de 12,14% $m.m^{-1}$. Já na camada subsuperficial (20 a 40 cm), a fração areia do solo apresentou magnitude variando de 56,29 a 80,33% $m.m^{-1}$, com média de 70,46% $m.m^{-1}$, a fração silte apresentou magnitude de 2,92 a 25,00% $m.m^{-1}$, com média de 15,62% $m.m^{-1}$, já a fração argila variou de 5,71 a 32,74% $m.m^{-1}$, com média de 139,13% $m.m^{-1}$.

Gonçalves (2002) revela que quanto menor for a gradiente textural entre as camadas superficial e subsuperficial e maior permeabilidade dos horizontes do solo, maior sua capacidade de drenagem, menores são os riscos de saturação e escoamento superficial das águas da chuva. Portanto, práticas mais intensivas de preparo de solo são menos nocivas à sua conservação. No entanto, solos com alto gradiente textural entre camadas apresentam grandes diferenças de permeabilidade ao longo do perfil, por consequência, maiores riscos de erosão.

Na profundidade de 0 a 40 cm a fração areia apresentou uma amplitude variando de 60,91 a 79,37% $m.m^{-1}$, com média geral de 71,52% $m.m^{-1}$ e desvio padrão de 3,66% $m.m^{-1}$. A fração silte do solo apresentou amplitude oscilando entre 5,06 e 21,79% $m.m^{-1}$, com média geral de 15,42% $m.m^{-1}$ e desvio padrão de 2,67% $m.m^{-1}$. Já a fração argila oscilou entre 5,71% e 26,43% $m.m^{-1}$, com média geral de 13,06% $m.m^{-1}$ e desvio padrão de 3,64% $m.m^{-1}$. Segundo Gonçalves (2002), solos com mais de 15% $m.m^{-1}$ de argila revelam plasticidade (capacidade de ser moldado) e pegajosidade (capacidade de aderir a outros objetos). Portanto, quanto mais rico em argila, maior a pegajosidade, a plasticidade, a capacidade de retenção de água e menor permeabilidade do solo.

Gonçalves (2002) revela que os solos arenosos, ricos em macroporos e muito permeáveis, durante uma chuva de pouca intensidade, podem absorver toda a água. Entretanto, por possuírem baixa proporção de partículas argilosas e matéria orgânica, o escoamento das enxurradas, mesmo em pequena quantidade, pode causar o arrastamento de grande quantidade de solo, devido à baixa coerência entre partículas. Nos solos argilosos, com menor macroporosidade, a capacidade de infiltração de água é menor, resultando em maior quantidade de enxurrada com potencial erosivo. Todavia, devido à maior força de coesão entre as partículas de argila, os solos argilosos oferecem maior resistência do que os arenosos ao fluxo de enxurrada. Em função da maior coerência entre partículas, por conseguinte, menor facilidade de desagregação, quanto mais argiloso o solo, maior a tendência para que o tipo de erosão predominante seja a laminar. Ao contrário, nos solos mais arenosos, tende a prevalecer a erosão em sulcos.

5.2.3 Interpretação dos resultados das análises das variáveis químicas do solo

Os resultados para análise química dos solos das parcelas amostradas estão apresentados no Apêndice 5. Utilizando a classificação da Comissão de Fertilidade do Solo RS/SC (2004) para interpretação das análises químicas dos solos, observou-se que as áreas avaliadas apresentaram valores de pH em água muito baixos ($\leq 5,0$), oscilando entre 3,8 a 4,8, com média de 4,2 e desvio padrão de 0,2; teor da saturação da CTC por bases muito baixo ($< 45\%$), oscilando entre 4,5 e 31,7 %, com média geral de 13,4 % e desvio padrão de 7,2 %. Os resultados para saturação da CTC por bases indicam que se trata de solos distróficos, em que menos da metade das cargas negativas do solo estão ocupadas pelos cátions básicos (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+). Do ponto de vista da fertilidade do solo, os melhores solos são os eutróficos, pois apresentam maior proporção de nutrientes e menores proporções de cátions ácidos (Al^{+3} e H^+) que podem ser tóxicos à planta.

O teor da saturação da CTC por alumínio foi considerado alto ($> 20\%$), variando de 29 a 82 %, com média de 59,4 % e desvio padrão de 12,2 %. Esses valores apontam que se tratam de solos de caráter alumínico e álico. Do ponto de vista da fertilidade não é interessante a presença de caráter alítico, alumínico ou alíco, pois indicam concentração relativamente elevada do cátion Al^{+3} , o qual não é um nutriente, e pode ser tóxico às raízes das plantas em concentrações elevadas. O teor de matéria orgânica encontrado foi considerado baixo ($\leq 2,5\%$), variando de 1 a 2,4 %, com média geral de 1,5 % e desvio padrão de 0,3 %. Segundo Gonçalves (2002b), o teor de matéria orgânica do solo tem grande relação com a sua erodibilidade. Nos solos mais ricos em matéria orgânica, a capacidade de aglutinação de partículas do solo é maior, aumentando sua capacidade de retenção de água e infiltração. O teor da CTC potencial foi classificado como baixo ($\leq 5 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) e médio (5,1 a 15,0 $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$, oscilando entre 4,4 a 11,5 $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$, com média de 7,0 $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ e desvio padrão de 1,5 $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$).

O teor de P disponível foi considerado de muito baixo ($\leq 7,0 \text{ mg}.\text{dm}^{-3}$) a baixo (7,1 a 14,0 $\text{mg}.\text{dm}^{-3}$), oscilando entre 1 e 7 $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$, com média geral de 3 $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ e desvio padrão de 1 $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$. Segundo Tomé Junior (1997), a análise de fósforo disponível visa mais classificar a possibilidade de resposta à adubação fosfatada do que fornecer um valor numérico exato da quantidade de fósforo existente no solo. Assim, se os teores são classificados como baixos pode-se

esperar maior resposta à adubação do que os teores médios ou altos. O teor de K trocável encontrado foi classificado como baixo (21 a 40 mg.dm⁻³), médio (41 a 60 mg.dm⁻³) e alto (61 a 120 mg.dm⁻³), variando entre 27 a 94 mg.dm⁻³, com média geral de 50 mg.dm⁻³ e desvio padrão de 14 cmol_c.dm⁻³; o teor de Ca trocável foi classificado como baixo ($\leq 2,0$ cmol_c.dm⁻³), variando entre 0,1 a 1,9 cmol_c.dm⁻³, com média geral de 0,6 cmol_c.dm⁻³ e desvio padrão de 0,4 cmol_c.dm⁻³; já o teor de Mg trocável encontrado foi classificado como baixo ($\leq 0,5$ cmol_c.dm⁻³) a médio (0,6 a 1,0 cmol_c.dm⁻³), oscilando entre 0,1 e 0,7 cmol_c.dm⁻³, com média geral de 0,2 cmol_c.dm⁻³ e desvio padrão de 0,1 cmol_c.dm⁻³.

O teor de cobre (Cu) foi de baixo ($< 0,2$ mg.dm⁻³), médio (0,2 a 0,4 mg.dm⁻³) e alto ($> 0,4$ mg.dm⁻³), variando de 0,1 a 1,3 mg.dm⁻³, com média geral de 0,5 mg.dm⁻³ e desvio padrão de 0,3 mg.dm⁻³; Zn de médio (0,2 a 0,5 mg.dm⁻³) a alto ($> 0,5$ mg.dm⁻³), variando de 0,3 a 0,8 mg.dm⁻³, com média geral de 0,4 mg.dm⁻³ e desvio padrão de 0,1 mg.dm⁻³; Mn alto ($> 5,0$ mg.dm⁻³), oscilando entre 18 e 171 mg.dm⁻³, com média geral de 70 mg.dm⁻³ e desvio padrão de 31 mg.dm⁻³. A disponibilidade de Mn pode ser muito variável, pois este elemento está sujeito ao processo de oxi-redução (SERRAT; KRIEGER; MOTTA, 2006).

Resultados semelhantes aos encontrados no presente estudo foram observados por Mochiutti (2007). Avaliando a produtividade de plantações de acácia-negra em 4 municípios da Encosta Inferior do Nordeste e Depressão Central no Rio Grande do Sul, o autor encontrou teores de P de muito baixo a alto; matéria orgânica de baixo a médio; Al de baixo a alto; K de baixo a médio; Ca baixo; Mg de baixo a médio; e acidez muito alta.

Quanto à classificação do teor de argila das parcelas, 4 parcelas (40, 50, 76 e 95) foram classificadas como classe 3 (21 a 40%) e as demais parcelas foram classificadas como classe 4 ($\leq 20\%$). Segundo a Comissão de Fertilidade do Solo RS/SC. (2004), o nível adequado corresponde à faixa “Alto”, o objetivo do sistema de recomendação de fertilizantes é atingir e permanecer nesta faixa. Por este critério, o teor crítico é o limite inferior da faixa “Alto”, em que normalmente obtêm-se rendimentos próximos à máxima eficiência econômica das culturas. As faixas “Muito baixo”, “Baixo” e “Médio” indicam situações de probabilidade de resposta à adição do nutriente, muito alta, alta e média, respectivamente.

O índice SMP variou de 5,2 a 6,2, com média geral de 5,8 e desvio padrão de 0,2. O método SMP é atualmente empregado nos estados do Rio Grande do Sul

e Santa Catarina, permitindo determinar a necessidade de calagem diretamente através de uma tabela. Este é resultado de uma curva que relaciona a necessidade de calagem com pH da suspensão do solo com tampão SMP. A vantagem principal deste método é que a necessidade de calagem pode ser obtida somente das medidas de pH desejado do solo e do pH SMP. Para a cultura da acácia-negra procura-se atingir um pH 5,5 em água (1:1, relação solo:água). (Comissão – RS/SC, 2004). Segundo Tomé Júnior (1997), quanto mais baixo o índice SMP, maior a quantidade de H+Al no solo e, portanto, maior a quantidade de calcário a ser aplicada para atingir um pH adequado neste solo.

A saturação de cálcio oscilou entre 4,5 a 42,4%, com média geral de 20,8% e desvio padrão de 10,5%, a saturação de magnésio oscilou entre 2,6 a 15,9%, com média geral de 6,6% e desvio padrão de 3,1%. De acordo com Prevedello, Krieger e Motta (2003), para um solo fértil e com boas condições nutricionais para as culturas, a saturação de Ca e Mg seria de 50 a 70% e 10 a 15%, respectivamente. Já a relação Ca/Mg variou entre 1,0 e 6,0, com média geral de 3,2 e desvio padrão de 0,9. Muitos estudos, procurando verificar a influência da relação Ca/Mg no crescimento e produção das culturas, têm encontrado resultados variados mesmo quando a relação está acima ou abaixo dos valores considerados ideais (3/1 a 6/1). Entretanto, é importante estar atento a valores extremos, que em casos específicos podem vir a afetar o crescimento de plantas exigentes em Ca ou em Mg (PREVEDELLO; KRIEGER; MOTTA, 2003).

Outras qualidades químicas avaliadas foram o teor de Na, que variou de 2 a 12 mg.dm⁻³, com média de 5 mg.dm⁻³ e desvio padrão de 2 mg.dm⁻³; teor de Al trocável que variou de 0,9 a 3 cmol_c.dm⁻³, com média de 1,6 cmol_c.dm⁻³ e desvio padrão de 0,4 cmol_c.dm⁻³; teor de Fe que oscilou entre 0,04 e 0,6% m.v⁻¹, com média de 0,08% m.v⁻¹ e desvio padrão de 0,06% m.v⁻¹; CTC efetivo que oscilou entre 1,5 e 4,5 cmol_c.dm⁻³, com média de 2,7 cmol_c.dm⁻³ e desvio padrão de 0,7 cmol_c.dm⁻³; acidez potencial (H+Al) que oscilou entre 3,5 e 10,9 cmol_c.dm⁻³, com média de 5,9 cmol_c.dm⁻³ e desvio padrão de 1,4 cmol_c.dm⁻³; relação Ca/K que variou entre 0,6 a 17,1, com média de 5,1 e desvio padrão de 3,9, e relação Mg/K que variou entre 0,4 e 5,7, com média de 1,6 e desvio padrão de 1,2.

O significado analítico dos resultados de amostras de solos depende da relação destes com o desenvolvimento das plantas. Essa relação não é perfeita, visto que o desenvolvimento das culturas resulta do efeito associado de diversos

fatores de produção, além das variáveis ligadas à fertilidade do solo (Comissão – RS/SC, 1994). Um maior detalhamento da interpretação das análises químicas do solo pode ser consultado nas obras de Tome Jr. (1997) e Comissão de Fertilidade do Solo RS/SC (2004).

5.3 MODELAGEM DO ÍNDICE DE SÍTIO

5.3.1 Correlação dos atributos do meio físico sobre o Índice de Sítio

5.3.1.1 Efeito das variáveis de posicionamento das parcelas

Na Tabela 12 é possível observar a correlação de Pearson da altitude e profundidade do solo em relação às variáveis \overline{DAP} , \overline{HT} , $HDOM$, IS_7 , V e G . Nota-se que as medidas de posicionamento das parcelas não apresentaram correlações significativas, pelo teste t , com nenhuma das variáveis acima. Isto indica que, para as circunstâncias avaliadas, as medidas de posicionamento das parcelas não foram capazes de explicar as diferenças nessas variáveis do povoamento florestal. Em contraste, Schöunau e Aldwrth (1991), examinando 67 povoamentos de acácia negra na África do Sul, encontraram correlação de 0,367 entre a profundidade efetiva do solo e crescimento em dap , embora esta correlação seja mais expressiva que a encontrada no presente estudo, estes autores também observaram que o coeficiente de correlação não apresentou significância estatística.

TABELA 12. CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS DE POSICIONAMENTO E AS VARIÁVEIS \overline{DAP} , \overline{HT} , $HDOM$, IS_7 , V E G

Variável	Coeficiente de correlação (r)					
	\overline{DAP}	\overline{HT}	$HDOM$	IS_7	V	G
Altitude	0,036	0,090	0,007	0,009	0,034	0,012
Profundidade do solo	-0,023	-0,001	0,106	0,106	0,131	0,155

FONTE: O autor (2018).

Em que: Coeficiente de correlação (r) = Coeficiente de correlação linear de Pearson; \overline{DAP} = diâmetro à altura do peito médio (cm); \overline{HT} = altura total média (m); $HDOM$ = altura dominante (m); IS_7 = índice de sítio aos 7 anos (m); V = volume total ($m^3 \cdot ha^{-1}$); G = área basal ($m^2 \cdot ha^{-1}$).

Os desdobramentos da correlação de Pearson em efeitos diretos e indiretos entre as variáveis de posicionamento e o potencial produtivo (IS_7) não foram apresentados, pois as correlações não foram significativas, ou seja, as variáveis de posicionamento não foram capazes de explicar as diferenças nos Índices de Sítios para a espécie.

5.3.1.2 Efeito das variáveis granulométricas do solo

As correlações de Pearson entre as variáveis granulométricas do solo e as variáveis \overline{DAP} , \overline{HT} , HDOM, IS_7, V e G de plantios comerciais de acácia negra podem ser observadas na Tabela 13, verifica-se que as variáveis granulométricas do solo não apresentaram correlação significativa, pelo teste t , com nenhuma das variáveis acima, indicando que, para as circunstâncias avaliadas, a granulometria do solo não foi capaz de explicar as diferenças nessas variáveis para a espécie.

TABELA 13. CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS GRANULOMÉTRICAS E AS VARIÁVEIS \overline{DAP} , \overline{HT} , HDOM, IS_7, V E G

Variável	Coeficiente de correlação (r)					
	\overline{DAP}	\overline{HT}	HDOM	IS_7	V	G
Areia (0-40)	0,107	0,061	0,123	0,123	0,152	0,153
Silte (0-40)	-0,192	-0,145	-0,192	-0,193	-0,155	-0,137
Argila (0-40)	0,035	0,047	0,019	0,020	-0,039	-0,053

FONTE: O autor (2018).

Em que: Coeficiente de correlação (r) = Coeficiente de correlação linear de Pearson; \overline{DAP} = diâmetro à altura do peito médio (cm); \overline{HT} = altura total média (m); HDOM = altura dominante (m); IS_7 = índice de sítio aos 7 anos (m); V = volume total ($m^3 \cdot ha^{-1}$); G = área basal ($m^2 \cdot ha^{-1}$).

Não foram apresentados os efeitos diretos e indiretos das variáveis granulométricas sobre o potencial produtivo (IS_7) da acácia negra, pois as correlações não foram significativas. Dessa maneira, pode-se afirmar que não há influência das características granulométricas do solo na produtividade de acácia negra.

5.3.1.3 Efeito das variáveis químicas do solo

Não foi possível estabelecer relações para a maior parte das variáveis analisadas (Tabela 14). Para a variável HDOM, a única variável do solo que apresentou correlação significativa ($p < 0,05$) foi a MO (-0,210). Já para as variáveis \overline{HT} e \overline{DAP} , a única variável do solo que apresentou correlação significativa foi o pH (água), com correlações de -0,284 ($p < 0,01$) e -0,248 ($p < 0,05$), respectivamente. O mesmo ocorreu para as variáveis V e G, em que a única variável que apresentou correlação significativa foi o pH (água), com correlações de -0,293 para ambas. Entretanto, nota-se que, apesar destas relações apresentarem significância estatística, foram de baixa magnitude. Em contraste, na Serra do Sudeste no Rio Grande do Sul, encontrou-se correlações significativas entre o dap da acácia-negra, aos quatro anos de idade, e a saturação de alumínio (-0,65), Ca + Mg (0,55) e a saturação de bases (0,60) do horizonte superficial (EMBRAPA, 1997).

Estudando a produtividade de plantações de acácia negra no Rio Grande do Sul, Mochiutti (2007) observou que somente as variáveis P, Al e CTC do horizonte A apresentaram correlação significativa com a altura dominante. No entanto, estas correlações também foram de baixa magnitude (0,237; -0,232; e -0,219, respectivamente). Estes resultados demonstram a dificuldade do estabelecimento de relações diretas entre os atributos do solo e o crescimento da espécie. Ainda de acordo com Mochiutti (2007), o acúmulo de nutrientes na parte aérea da acácia negra cresce com o incremento de biomassa acima do solo, em que a maior quantidade de N, S, P (até 5 anos) e Mg (até 6 anos) são acumulados nos compartimentos da copa das árvores e de K, Ca, P (após 5 anos) e Mg (após 6 anos) estão alocados no tronco. Segundo este mesmo autor, a maior demanda de P e K do solo ocorre no segundo ano das plantações, de N, Mg e S a partir de 3 anos de idade e de Ca após 4 anos.

Maestri et al. (1987) encontraram um acréscimo de 95,2% na produtividade média de acácia negra com três anos de idade pela aplicação de fostato de Araxá no Rio Grande do Sul. A aplicação de P e K no plantio de acácia-negra na África do Sul incrementou a produção de casca em $7 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ e de volume em $60 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (Hebert, 1991). Schönau e Aldwrth (1991), estudando 67 povoamentos de acácia negra na África do Sul, encontraram correlações entre o crescimento da espécie

somente para o pH do horizonte B (0,271) e profundidade efetiva do solo (0,367), porém estas foram de baixa magnitude.

Saidelles (2005) quantificou a demanda por nutrientes exigidos por árvores de acácia negra, aos 4 anos de idade, no estado do Rio Grande do Sul. A quantidade de macronutrientes exigidos pela planta, dada em kg.ha^{-1} , foi de 384,94 de N; 15,69 de P; 200,06 de K; 267,74 de Ca; 58,54 de Mg e 18,67 de S. Já a quantidade de micronutrientes exigidos, em g.ha^{-1} , foi de 1.249,01 de B; 195,33 de Cu; 6.485,64 de Fe, 1.073,52 de Mn e 809,33 de Zn. Resultados semelhantes foram encontrados por Caldeira et al. (1999), quantificando nutrientes em um povoamento jovem de acácia-negra estabelecido na região sul do Brasil. Embora os micronutrientes sejam exigidos em quantidades muito pequenas pelas plantas, existem evidências de que deficiências de micronutrientes podem afetar a produção das culturas, sobretudo em solos tropicais mais intemperizados, onde a disponibilidade dos mesmos é muito baixa (LOPES; CARVALHO, 1988).

Bognola (2007), estudando o efeito das variáveis físicas sobre o crescimento de *Pinus taeda*, encontrou forte correlação entre a matéria orgânica com a disponibilidade de água nos solos, em que à medida que aumenta o teor de matéria orgânica também aumenta a capacidade de retenção de água. No entanto, o autor observou uma queda acentuada nos índices de sítio à medida que aumenta a água disponível no solo apresentando. Portanto, correlação negativa entre elas, pois também é importante uma boa aeração dos solos para que haja um bom desenvolvimento das plantas.

TABELA 14. CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS QUÍMICAS DO SOLO E AS VARIÁVEIS \overline{DAP} , \overline{HT} , HDOM, IS_7, V E G

Variável	Coeficiente de correlação (r)					
	\overline{DAP}	\overline{HT}	HDOM	IS_7	V	G
pH (água)	-0,248*	-0,284**	-0,160	-0,162	-0,293**	-0,293**
SMP	-0,072	-0,037	0,002	0,001	-0,080	-0,095
P	-0,030	-0,019	-0,124	-0,125	-0,029	-0,020
K ⁺	0,015	0,030	0,024	0,025	0,036	0,053
Na ⁺	-0,010	-0,051	0,012	0,013	0,071	0,104
MO	-0,105	-0,123	-0,210*	-0,211*	-0,056	-0,031
Argila	-0,072	-0,017	-0,116	-0,115	-0,147	-0,158
Al ⁺³	0,059	0,049	0,034	0,035	-0,001	-0,004
Ca ⁺²	0,075	0,011	0,007	0,009	-0,024	-0,020
Mg ⁺²	0,032	-0,010	0,008	0,009	-0,015	-0,004
Mn	-0,119	-0,020	-0,086	-0,086	-0,098	-0,091
Zn	-0,028	-0,012	0,008	0,007	0,070	0,095
Cu	-0,087	-0,020	-0,107	-0,098	-0,110	-0,086
Fe	0,052	0,053	0,018	0,019	-0,038	-0,045
CTCef	0,069	0,039	0,016	0,018	-0,024	-0,019
H+Al	0,050	0,026	-0,014	-0,013	0,069	0,084
CTCpot	0,062	0,030	-0,014	-0,013	0,055	0,073
V	0,042	0,013	0,031	0,032	-0,029	-0,032
Sat,Ca	0,095	0,031	0,039	0,040	0,018	0,019
Sat,Mg	0,023	-0,018	0,025	0,026	0,019	0,031
Sat,Al	-0,043	-0,032	-0,027	-0,028	-0,019	-0,026
Ca/Mg	0,131	0,110	0,031	0,033	-0,018	-0,047
Ca/K	0,104	0,026	0,032	0,033	-0,020	-0,025
Mg/K	0,062	-0,001	0,029	0,030	-0,020	-0,019

FONTE: O autor (2018).

Em que: Coeficiente de correlação (r) = Coeficiente de correlação linear de Pearson; * = significância a 95% de probabilidade; ** = significância a 99% de probabilidade; \overline{DAP} = diâmetro à altura do peito médio (cm); \overline{HT} = altura total média (m); HDOM = altura dominante (m); IS_7 = índice de sítio aos 7 anos (m); V = volume total (m³.ha⁻¹); G = área basal (m².ha⁻¹).

Verifica-se, que do conjunto de variáveis químicas analisadas apenas a matéria orgânica (MO) apresentou coeficiente de correlação total significativa pelo teste *t* (*p*<0,05) com o Índice de Sítio (IS_7). Portanto, somente esta variável foi apresentada na Tabela 15, com os seus respectivos efeitos diretos e indiretos sobre o potencial produtivo da acácia-negra. Observa-se por esta tabela que o valor do efeito direto da matéria orgânica encontrada (-0,277) com o IS_7 é negativamente relacionado. No entanto, o valor modular do efeito direto da matéria orgânica não supera o valor encontrado para o efeito residual (0,902). Ademais, a análise não

apresentou coeficiente de determinação (R^2) adequado. Portanto, não se pode afirmar que há uma influência direta do teor de matéria orgânica na produtividade da acácia negra, havendo somente uma tendência de caráter geral de que possa influenciar o crescimento desta espécie.

TABELA 15. ANÁLISE DE TRILHA ENTRE A MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO E ÍNDICE DE SÍTIO (IS_7)

Variável	Efeitos		Correlação Total
	Direto sobre IS_7	Indireto sobre IS_7	
MO	-0,277	0,088	-0,211
R^2_{total}		0,187	
Efeito residual		0,902	
Valor-K		0,080	

FONTE: O autor (2018).

Em que: R^2_{total} = Coeficiente de determinação; Valor-K = constante K, cujo valor deve ser o menor possível para estabilizar os coeficientes de trilha e manter o VIF menor que 10.

5.3.2 Redução da dimensionalidade dos dados

5.3.2.1 Adequação da aplicabilidade da Análise de Componentes Principais

Com objetivo de reduzir o número de variáveis independentes (variáveis de posicionamento, granulométricas e químicas) em poucos componentes e eliminar a multicolinearidade entre as variáveis, buscou-se utilizar técnicas de estatística multivariada como a Análise de Componentes Principais (ACP). A análise por componentes principais possui a propriedade de reter, em ordem de estimativa, o máximo de informação, em termos de variação total, contida nos dados iniciais. Preliminarmente, foi aplicado o teste de Bartlett aos dados para testar a hipótese de que as variáveis não sejam correlacionadas na população.

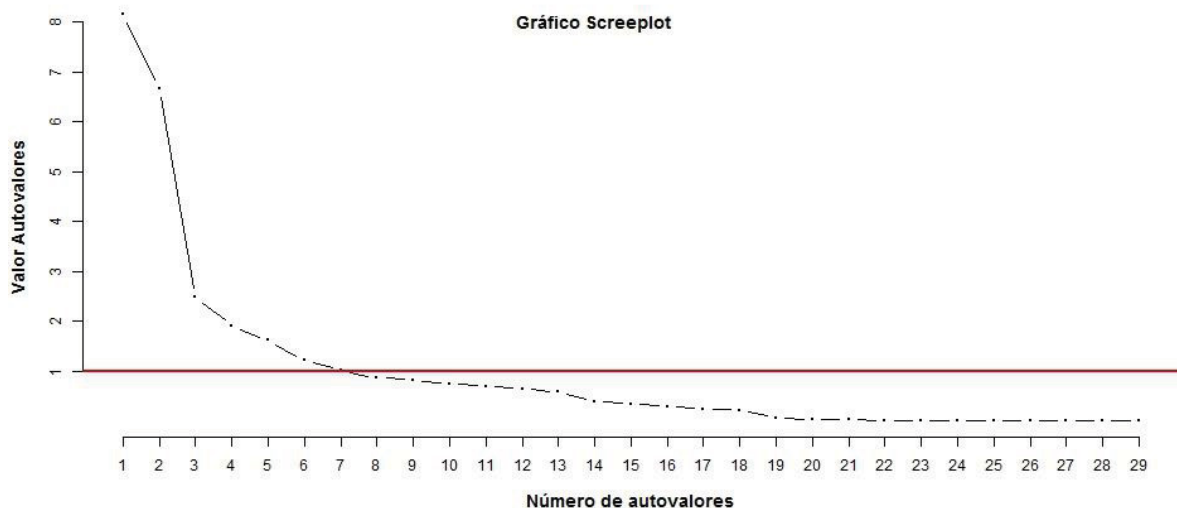
O teste de esfericidade de Bartlett é um dos meios de se verificar a adequação da aplicação da análise de componentes principais. O teste identifica a presença de correlações não nulas entre variáveis, testando a hipótese nula de que a matriz de correlação é uma matriz identidade. Se essa hipótese for rejeitada, então a análise de componentes principais pode ser aplicada. O teste examina a matriz de correlação interna, e fornece a probabilidade estatística de que a matriz de

correlações possui correlações estatisticamente significativas entre pelo menos um par de variáveis, sendo que o teste torna-se mais eficiente em detectar as correlações na medida em que se aumenta o tamanho da amostra (FERREIRA JÚNIOR, 2004). Verificou-se que as variáveis não apresentaram independência umas das outras ($p = 0$), portanto, mostrando que existe correlação significativa entre as variáveis. Assim, a análise de componentes principal foi relevante para o conjunto de dados.

5.3.2.2 Análise de Componentes Principais entre as variáveis do meio físico

Os componentes principais obtidos apresentaram autovalores que oscilaram entre 0 e 8,143 (Figura 12). Na Tabela 16, é possível observar os autovalores e a percentagem da variância para cada componente principal, bem como a percentagem da variância acumulada. A seleção do número de componentes principais foi baseada no critério de análise da qualidade de aproximação da matriz de correlações (critério de Kaiser), apresentando-se somente os componentes associados a autovalores superiores a 1 (Tabela 16). Nota-se que o primeiro componente principal responde por cerca de 28% da variância total dos dados, ao passo que se tomarmos os dois primeiros componentes atingimos cerca de 51% da variância total. Segundo Lattin, Carrol e Green (2011), isso já era esperado, visto que o primeiro componente trata-se da combinação linear entre todas as variáveis, portanto, expressa a máxima variância e, por conseguinte, maior autovalor. Já se forem tomados os 7 primeiros componentes principais, atinge-se 79,44% da variação total dos dados. A partir disto é possível dizer que as 29 variáveis independentes estudadas podem ser substituídas por estes 7 componentes principais, com perda de 20,56% de informação.

FIGURA 12. AUTOVALOR (λ) CORRESPONDENTE A CADA COMPONENTE PRINCIPAL OBTIDO A PARTIR DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS APLICADA ÀS VARIÁVEIS INDEPENDENTES



FONTE: O autor (2018).

TABELA 16. AUTOVALORES (λ) E PERCENTUAIS DAS VARIÂNCIAS DOS SETE COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDOS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO, R, DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

Componente	Autovalor	% Variância do Componente	% Variância Acumulada
1	8,143	28,08	28,08
2	6,668	22,99	51,07
3	2,478	8,55	59,62
4	1,906	6,57	66,19
5	1,616	5,57	71,77
6	1,22	4,21	75,97
7	1,004	3,46	79,44

FONTE: O autor (2018).

5.3.3 Análise de Regressão Linear Múltipla

Com o objetivo de apontar a melhor equação de regressão para o Índice de Sítio aos 7 anos de idade (IS_7), para plantios comerciais de acácia-negra, com base nas 29 variáveis independentes, relacionadas aos atributos do meio físico, utilizou-se da técnica de análise de regressão linear múltipla. A análise de regressão foi realizada em duas etapas: na primeira, foram utilizados os escores dos 7 primeiros componentes principais para o ajuste da regressão; na segunda etapa a

análise de regressão foi realizada através do procedimento passo a passo (*stepwise*) com todas as variáveis independentes originais.

5.3.3.1 Regressão utilizando os Componentes Principais

Na Tabela 17 pode-se observar a análise de variância e pela Tabela 18, os coeficientes do modelo de regressão definido com a utilização dos 7 componentes principais.

TABELA 17. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA UTILIZANDO OS ESCORES DOS 7 PRIMEIROS COMPONENTES PRINCIPAIS OBTIDOS

Fontes de Variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F ₀	Pr > F ₀
Regressão	7	11,31843	1,616918	1,1768	0,325
Resíduo	83	114,0408	1,373986		
Total	90	125,3592			

FONTE: O autor (2018).

TABELA 18. COEFICIENTES DO MODELO DE REGRESSÃO UTILIZANDO OS ESCORES DOS 7 PRIMEIROS COMPONENTES PRINCIPAIS OBTIDOS

Coeficientes	Parâmetro Estimado	Erro	t	Pr > t
β_0	19,36036	0,1229	157,5589	1E-104
β_1	0,009847	0,0479	0,2056	0,8376
β_2	-0,062292	0,0784	-0,7942	0,4293
β_3	0,17061	0,0896	1,9040	0,0604
β_4	-0,040793	0,0973	-0,4190	0,6763
β_5	-0,174937	0,1121	-1,5605	0,1224
β_6	0,071318	0,1234	0,5780	0,5648
β_7	-0,134565	0,1326	-1,0150	0,3131

FONTE: O autor (2018).

* Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{Ajustado}) = 0,0136.

A equação de regressão utilizando os 7 componentes principais é apresentada na equação 36.

$$IS_7 = \beta_0 + \beta_1 * CP_1 - \beta_2 * CP_2 + \beta_3 * CP_3 - \beta_4 * CP_4 - \beta_5 * CP_5 + \beta_6 * CP_6 - \beta_7 * CP_7 \quad (36)$$

Em que:

CP_n = Componente Principal n.

Observa-se por esta análise que os 7 componentes principais não foram capazes de explicar variações no Índice de Sítio para a acácia-negra (IS_7). O coeficiente de determinação ajustado do modelo foi de 0,0136 e o erro padrão da estimativa em porcentagem ($S_{yx}\%$) de 6,05%, revelando baixas estatísticas de precisão para a modelagem do Índice de Sítio através dos componentes principais.

5.3.3.2 Regressão utilizando as 29 variáveis do meio físico

Na Tabela 19 é possível observar a análise de variância e pela Tabela 20, os coeficientes do modelo de regressão definido pelo método *stepwise* para as 29 variáveis independentes originais.

TABELA 19. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA ATRAVÉS DO MÉTODO STEPWISE UTILIZANDO AS 29 VARIÁVEIS INDEPENDENTES ORIGINAIS

Fontes de Variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F_0	$Pr > F_0$
Regressão	1	5,57648	5,57648	4,14	0,0448
Resíduo	89	119,78200	1,34582		
Total	90	125,35924			

FONTE: O autor (2018).

TABELA 20. COEFICIENTES DO MODELO DE REGRESSÃO ATRAVÉS DO MÉTODO STEPWISE UTILIZANDO AS 29 VARIÁVEIS INDEPENDENTES ORIGINAIS

Coeficientes	Parâmetro Estimado	Erro	t	$Pr > t$
β_0	20,4717	0,5594	36,5937	0
β_1	-0,073901	0,0363	-2,0355	0,0448

FONTE: O autor (2018).

* Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{Ajustado}) = 0,0337.

A variável selecionada para a escolha do melhor modelo de regressão utilizando o procedimento *stepwise* é apresentada na equação 37.

$$IS_7 = 20,4717 - 0,073901 * MO \quad (37)$$

Em que:

MO = Matéria orgânica do solo.

Dentre todas as variáveis analisadas para compor o modelo preditivo, somente a matéria orgânica do solo teve significância estatística, mantendo relação negativa com o crescimento da acácia-negra. Esse resultado já era esperado, uma vez que durante a análise de trilha feita anteriormente, somente a matéria orgânica teve correlação significativa com o Índice de Sítio (IS_7), corroborando com o resultado aqui encontrado. No entanto, nota-se, mais uma vez por esta análise, que a equação ajustada não foi capaz de explicar variações no Índice de Sítio para a acácia-negra. O coeficiente de determinação ajustado do modelo foi de 0,0337 e o erro padrão da estimativa em porcentagem ($S_{yx}\%$) de 5,99%, mostrando também baixas estatísticas de precisão para a modelagem do Índice de Sítio através do procedimento *stepwise*.

Entende-se, por estas análises, que para o presente estudo, as variáveis de posicionamento (altitude e profundidade efetiva do solo), granulométricas e químicas do solo não foram suficientes para explicar o crescimento de espécies de acácia-negra, nas condições ambientais locais. Esses resultados são corroborados pelo estudo de Mochiutti (2007). O autor avaliou a produtividade de plantações de acácia-negra em 4 municípios localizados na Encosta Inferior do Nordeste e Depressão Central, e observou que o valor de R^2 encontrado na análise de regressão múltipla indicou que a maior parte da variância da altura dominante não pôde ser explicada pelos fatores selecionados no modelo. Mesmo assim, foi possível identificar que os teores de P, K e da matéria orgânica tenham sido os atributos do solo que apresentaram relação positiva com o crescimento da acácia-negra. Resultados semelhantes foram encontrados por Kayahara, Carter e Klinka (1998), os autores investigaram a relação entre índice de sítio e nutrientes do solo para a espécie *Tsuga heterophylla* na costa sul da região de British Columbia no Canadá, e

concluíram que a maior produtividade dos povoamentos não foi explicada pela maior disponibilidade de nutrientes.

Por outro lado, Barbosa et al. (2012), estudando a produtividade de madeira de *Pinus* sp, concluíram que a produtividade pôde ser estimada, de forma diretamente proporcional, por um modelo matemático potencial dado em função do pH do solo na camada superficial do solo. Hunter e Gibson (1984) utilizaram a técnica de componentes principais e selecionaram variáveis edáficas e climáticas que interferiam no crescimento de *Pinus radiata* em plantios na Nova Zelândia. Estes autores observaram uma relação positiva entre o índice de sítio com a precipitação, fertilidade, profundidade e penetrabilidade do solo. Conrona et al. (1998) citados por Maestri (2003), estudando índice de sitio e sua relação com fatores ambientais na província de Firenze (Itália), observaram significativa influência da precipitação pluviométrica, excesso de água no solo, teor de argila, conteúdo de carbonato de cálcio e fisiografia. Segundo estes autores, cerca de 58% da variação observada no índice de sitio foi explicada pelas variáveis, num modelo de regressão linear múltipla.

Segundo Pedrotti et al. (2002), o desenvolvimento adequado das espécies florestais não depende apenas dos atributos químicos e biológicos do solo, mas também dos atributos físicos. Nesse sentido, o estado de agregação do solo é um importante atributo do solo, pois está relacionado com a aeração do solo, desenvolvimento radicular, suprimento de nutrientes, resistência à penetração e retenção e armazenamento de água. Conforme Gonçalves et al. (1990) e Rigato (2002), a existência de camadas de impedimento físico à penetração das raízes, drenagem interna impedida e capacidade de armazenamento de água e de oxigênio deficientes aumentam os riscos de estresse hídrico às plantas nos períodos de estiagem, sendo este último o fator mais limitante do crescimento das árvores. Já para Gonçalves et al. (2012), a ampla variação de produtividade florestal relaciona-se, em grande parte, com os atributos edáficos associados à capacidade de retenção de água disponível, como os teores de argila e matéria orgânica, que afetam diretamente o balanço hídrico do solo.

Segundo Gonçalves, Demattê e Couto (1990), as propriedades físicas do solo têm se relacionado, com maior frequência, à capacidade produtiva dos sítios florestais do que as químicas, principalmente nos aspectos da capacidade de retenção e armazenamento de umidade do solo. Essa informação é confirmada por

Maestri (2003), esse autor estudou povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis*, e concluiu que a disponibilidade de água afeta significativamente o crescimento da espécie. De maneira geral, considera-se que as propriedades físicas do solo são mais importantes que as químicas no manejo das plantações florestais (MOCHIUTTI, 2007). Bognola (2007), estudando a influência das características do meio físico sob a produtividade de *Pinus taeda* no Planalto Catarinense, concluiu que embora os valores dos coeficientes de correlação linear (r) entre as variáveis físico-hídricas e o Índice de Sítio para *Pinus taeda* não tenham sido muito elevados, porém foram suficientes para explicar o crescimento das árvores.

Assim sendo, torna-se impraticável a espacialização, das correlações, diretas e/ou indiretas, entre os atributos do solo analisados no presente estudo e a produtividade da cultura da acácia-negra. Portanto, a análise geoestatística foi realizada apenas por meio da krigagem ordinária, com o objetivo de espacializar apenas o Índice de Sítio para a espécie, sem a utilização dos atributos do meio físico. Sugere-se que sejam realizadas análises das características físico-hídricas no solo da região de estudo na tentativa de estabelecer relações com a produtividade florestal, tais como: densidade do solo, porosidade total do solo, micro e macroporosidade do solo, capacidade de campo, retenção de umidade, ponto de murcha permanente, drenagem interna, capacidade de armazenamento de água, retenção de água disponível, etc. Outras variáveis importantes são: a penetrabilidade do solo, estado de agregação do solo, aeração do solo, capacidade de armazenamento de oxigênio, entre outras.

5.4 ESPACIALIZAÇÃO DO ÍNDICE DE SÍTIO (IS_7)

O cálculo da dependência espacial (DE %) para o Índice de Sítio foi obtido por meio dos parâmetros obtidos no ajuste do semivariograma (Figura 13). Nota-se que para a variável Índice de Sítio, aos 7 anos de idade (IS_7), a dependência espacial foi considerada fraca ($DE < 25\%$), com 8,6% (Tabela 21), evidenciando a ocorrência de efeito pepita puro. Segundo Lima, Souza e Silva (2010), quanto menor a dependência espacial da variável, pior será a estrutura espacial e menor precisão obtida na estimativa em locais não amostrados. Portanto, a aplicação da análise geoestatística não é recomendada, pois na análise geral do desempenho do

semivariograma, a ocorrência da dependência espacial fraca ou nula caracteriza a aleatoriedade dos dados, não justificando a modelagem geoestatística.

Observa-se que, pelo fato da dependência espacial se tratar de uma relação entre o efeito pepita e o patamar, em porcentagem, a dependência espacial insatisfatória obtida neste estudo indicam um alto valor do efeito pepita, demonstrando um efeito insatisfatório no ajuste do semivariograma. De acordo com Yamamoto e Landim (2013), quanto maior o valor do efeito pepita, maior a variabilidade, e conseqüentemente, a amostragem se torna insuficiente para esse nível de variabilidade espacial. Para Yamamoto e Landim (2013), o efeito pepita reflete a incerteza em pequenas distâncias, principalmente pela falta de conhecimento da distribuição espacial da variável em estudo. Segundo Vieira (2000), possivelmente, em casos que ocorre o efeito pepita puro, a dependência espacial ocorre em uma distância menor do que a distância entre as unidades amostrais utilizadas.

Já Bognola (2007) obteve resultados bem diferentes dos encontrados neste trabalho. Estudando Unidades de Manejo para *Pinus taeda*, o autor verificou que o Índice de Sítio para a espécie em função de três componentes principais apresentou forte dependência espacial, na ordem de 80%, mostrando uma ótima estimativa do Índice de Sítio em locais não amostrados por meio da cokrigagem ordinária multivariada. Álvares et al. (2009), estudando a produtividade e qualidade de plantações de *Eucalyptus*, observaram forte dependência espacial para o incremento médio anual (IMA) em área basal e para altura dominante. Bila (2010) também obteve resultados satisfatórios na espacialização dos índices de sítio com base em fatores edáficos para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região de Prata, Minas Gerais. Resultados satisfatórios também foram obtidos por Höck, Payn e Shirley (1998), os autores estudaram Índices de Sítio para *Pinus radiata* na floresta de Kaingaroa na Nova Zelândia e concluíram que a altura dominante apresentou forte correlação e um ótimo indicativo do potencial da krigagem na classificação de sítio.

Pereira et al. (2013), utilizaram a geoestatística para a espacialização de atributos químicos do solo e dendrométricos em plantios de *Tectona grandis*, e obtiveram forte dependência espacial para as variáveis diâmetro e volume, e moderada para a altura. Barreto (2015), estudando a dependência espacial de atributos químicos do solo e variáveis da dinâmica florestal em um fragmento

florestal de Floresta Ombrófila Mista, observou forte dependência espacial para os incrementos correntes anuais em área basal, incrementos periódicos anuais em diâmetro e área basal. No entanto, a mesma autora não observou o mesmo comportamento satisfatório para os atributos químicos do solo. Já Pelissari et al. (2012), avaliando a correlação espacial dos atributos químicos do solo com o crescimento de *Tectona grandis* em Mato Grosso, encontraram forte dependência espacial para as bases Ca, Mg e K.

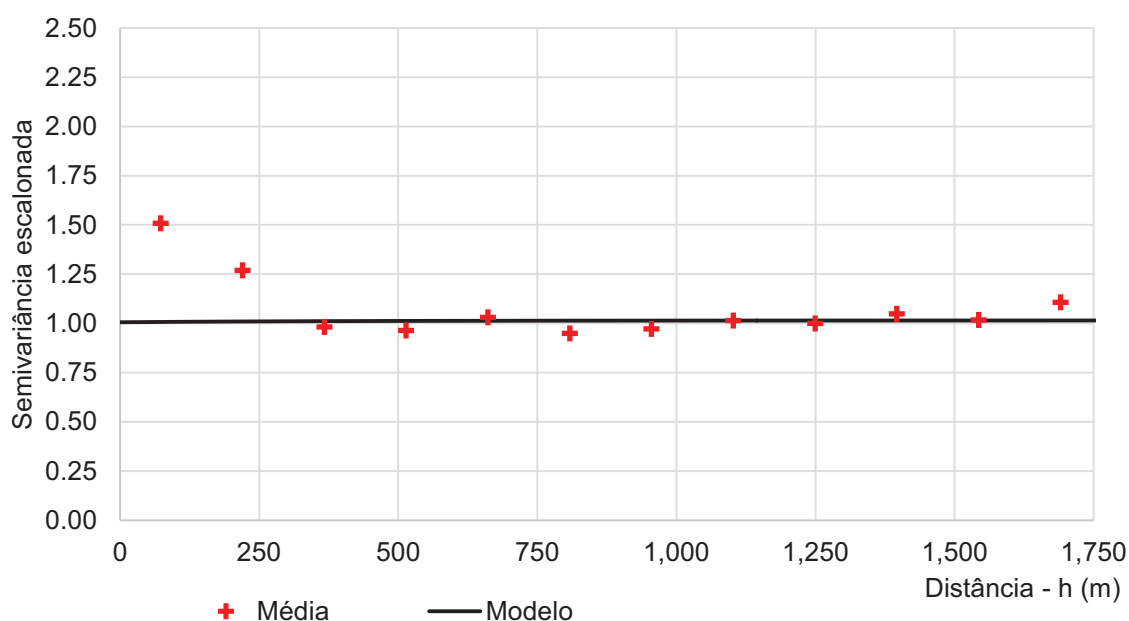
TABELA 21. ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DO MODELO EXPONENCIAL AJUSTADO À VARIÁVEL IS_7

Variável	N	τ^2	σ^2	$(\tau^2 + \sigma^2)$	ϕ (m)	DE (%)	Modelo
IS_7	91	0,9604	0,0904	1,0508	2246,06	8,6	Exponencial

FONTE: O autor (2018).

Em que: N = número de observações; τ^2 = efeito pepita; σ^2 = variação estruturada; $(\tau^2 + \sigma^2)$ = patamar; ϕ = alcance, e DE (%) = dependência espacial em percentagem.

FIGURA 13 - SEMIVARIOGRAMA AJUSTADO PARA O ÍNDICE DE SÍTIO (IS_7)



FONTE: O autor (2018).

Mesmo havendo três classes de Índice de Sítio, estas classes foram pouco representativas, dessa forma, a variável IS_7 não pôde ser modelada geoestatisticamente, pois não apresenta estrutura espacial, não existindo função

estrutural, com semivariância de comportamento modelável, portanto, não foi possível realizar a krigagem ordinária para essa variável, pois não houve padrões de variação do Índice de Sítio no povoamento florestal em questão. Observa-se que há uma característica marcante nessas plantações florestais, a aparente homogeneidade da altura dominante, não havendo variações significativas ao longo do plantio. Essa homogeneidade pode estar atrelada à robustez da espécie, existem árvores altas em todas as parcelas avaliadas, não variando significativamente devido às diferentes concentrações dos fatores do solo, diferente topografia, profundidade do solo ou outros. O crescimento homogêneo da espécie na área de estudo indica que a disponibilidade de nutrientes existente nos solos experimentais, de um modo geral, foi capaz de suprir a demanda para o crescimento.

Diversas características da acácia-negra fazem com que a espécie seja considerada uma espécie robusta. A acácia-negra se adapta a inúmeras condições ambientais por ser uma espécie pioneira de rápido crescimento. O estabelecimento das plantações pode ser realizado através do manejo da regeneração natural, semeadura direta ou por mudas. No entanto, a prática mais comum é o plantio feito por mudas, pois tem a vantagem de formar povoamentos mais homogêneos, que é o caso do presente estudo. As árvores desenvolvem-se bem mesmo em solos rasos e das mais variadas texturas, entre eles o argiloso (MOCHIUTTI, 2007). Para o seu cultivo, não há necessidade de área preparada intensivamente, somente nos solos compactados é recomendada a subsolagem e gradagem nas linhas de plantio (MOCHIUTTI, 2007).

Em área de segundo ciclo em diante, que não tenha sido compactada pela colheita, não há necessidade de preparo do solo, podendo ser realizado o plantio direto nas linhas de tocos (DEDECEK; HIGA, 2003). A espécie tolera solos relativamente pobres, embora requeira o fornecimento de nutrientes para um bom desenvolvimento (MOCHIUTTI, 2007). É capaz de se desenvolver bem em solos com características físicas desfavoráveis, desde que apresentem características químicas desejáveis ou com características químicas desfavoráveis e físicas apropriadas (RACHWAL; CURCIO; DEDECEK, 1997). A acácia-negra também não requer podas de formação e/ou condução.

5.5 GRUPOS HOMOGÊNEOS DE PARCELAS DE INVENTÁRIO FLORESTAL

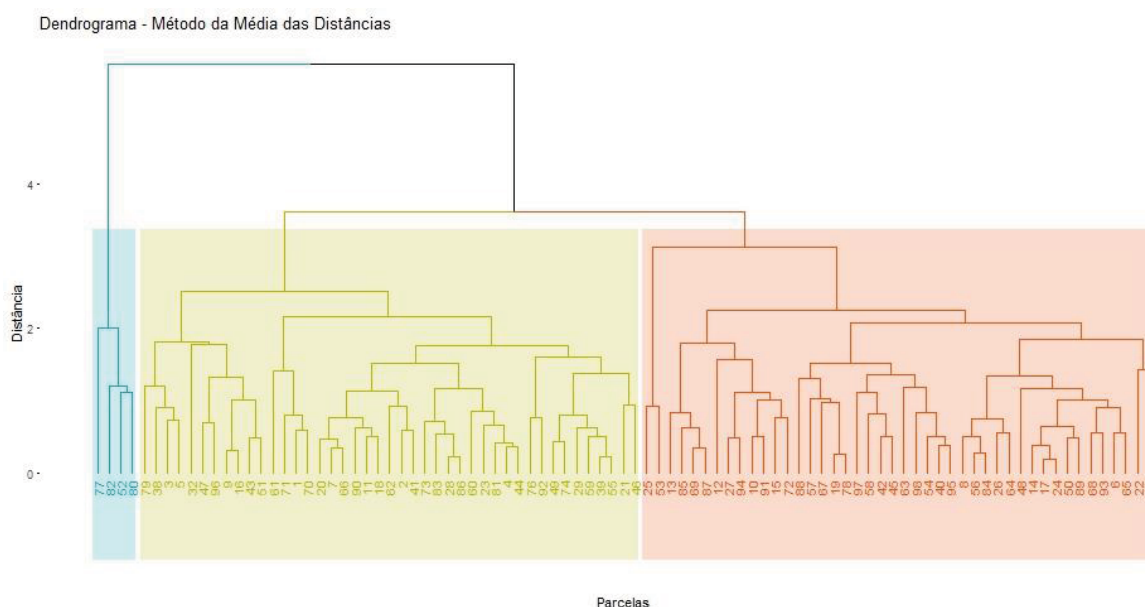
Foram agrupadas parcelas de inventário florestal segundo suas similaridades quanto ao \overline{DAP} , \overline{HT} , $HDOM$, IS_7 , V e G para acácia-negra. As variáveis de posicionamento, bem como as variáveis granulométricas e químicas selecionadas pelo método de ACP não foram incluídas nessa análise, pois não apresentaram correlação significativa com a produtividade florestal. Diante disso, a análise de agrupamento permitiu a formação de parcelas em grupos, de modo a existir homogeneidade dentro e heterogeneidade entre os grupos formados.

A reunião das Parcelas de Inventário Florestal em grupos homogêneos foi realizada por meio de diferentes combinações entre as medidas de dissimilaridades e métodos para formação dos grupos homogêneos. A melhor combinação foi encontrada utilizando a distância Euclidiana e o Método *Average Linkage*, essa combinação atingiu a melhor correlação cofenética (0,71). A distância Euclidiana permitiu avaliar a divergência entre as parcelas de inventário florestal e o Método *Average Linkage* permitiu a formação dos grupos homogêneos entre as parcelas de inventário florestal, de forma que os elementos relativos a um mesmo grupo fossem semelhantes entre si com respeito às variáveis de produtividade. O dendrograma formado é apresentado na Figura 14.

O grupo 1 é formado por apenas 4 parcelas, são elas: parcelas 52, 77, 80 e 82. Este grupo é formado pelas parcelas “mais produtivas”, pois, em geral, apresentam maiores valores para as variáveis analisadas (\overline{DAP} , \overline{HT} , $HDOM$, IS_7 , V e G). O grupo 2 é formado por 43 parcelas, são elas: parcelas 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 16, 18, 20, 21, 23, 28, 29, 32, 38, 39, 41, 43, 44, 46, 47, 49, 51, 55, 59, 60, 61, 62, 66, 70, 71, 73, 74, 76, 79, 81, 83, 86, 90, 92 e 96. Este grupo é o segundo grupo de parcelas mais produtivas, em geral, para as variáveis analisadas. Já o grupo 3 é formado por 44 parcelas, são elas: as parcelas 6, 8, 10, 12, 13, 14, 15, 17, 19, 22, 24, 25, 26, 27, 33, 40, 42, 45, 48, 50, 53, 54, 56, 57, 58, 63, 64, 65, 67, 68, 69, 72, 78, 84, 85, 87, 88, 89, 91, 93, 94, 95, 97 e 98. Este grupo é considerado o grupo das parcelas menos produtivas, pois apresentam, em geral, menores valores para as variáveis analisadas. Todos os grupos foram formados no mesmo plano de similaridades (utilizando a distância Euclidiana e o Método *Average Linkage*).

Bognola (2007) comparou as informações geradas pela análise de agrupamentos com as informações das classes de solos mapeadas em cada parcela de inventário florestal com o objetivo de verificar se a identificação da classe de solo permitia fazer inferências sobre a sua capacidade preditiva para a espécie florestal em estudo. No entanto, esse autor encontrou que a classe de solo, por si só, não consegue detectar as diferenças significativas entre as parcelas estudadas até o quarto nível categórico do Sistema para o segmento florestal.

FIGURA 14. DENDROGRAMA ILUSTRATIVO DA SIMILARIDADE ENTRE AS PARCELAS DE INVENTÁRIO FLORESTAL, OBTIDO PELO MÉTODO *AVERAGE LINKAGE*



FONTE: O autor (2018).

5.6 ESPACIALIZAÇÃO DAS MEDIDAS DE VARIABILIDADE

A dependência espacial para cada medida de variabilidade foi calculada através dos parâmetros obtidos nos ajustes dos semivariogramas (Figura 15), para todos os casos o melhor modelo ajustado foi o exponencial. Para a variável desvDAP, nota-se que a dependência espacial foi considerada moderada ($25 \% < DE \leq 75 \%$), com de 62,39 %. Para a variável desvHT, a dependência espacial foi considerada fraca ($DE < 25 \%$), com 21,93 %. A variável desvg obteve dependência espacial classificada como moderada, com 52,48%. A variável desvVOL também foi classificada como dependência espacial moderada, com 44,15 %. O índice de

uniformidade PV50 obteve classificação de dependência espacial considerada forte ($DE > 75 \%$), com 78,72 %. As estimativas dos parâmetros do modelo exponencial ajustado às variáveis acima relacionadas podem ser observadas na Tabela 22.

TABELA 22. ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DO MODELO EXPONENCIAL AJUSTADOS ÀS VARIÁVEIS desvDAP, desvHT, desvg, desvVOL e PV50

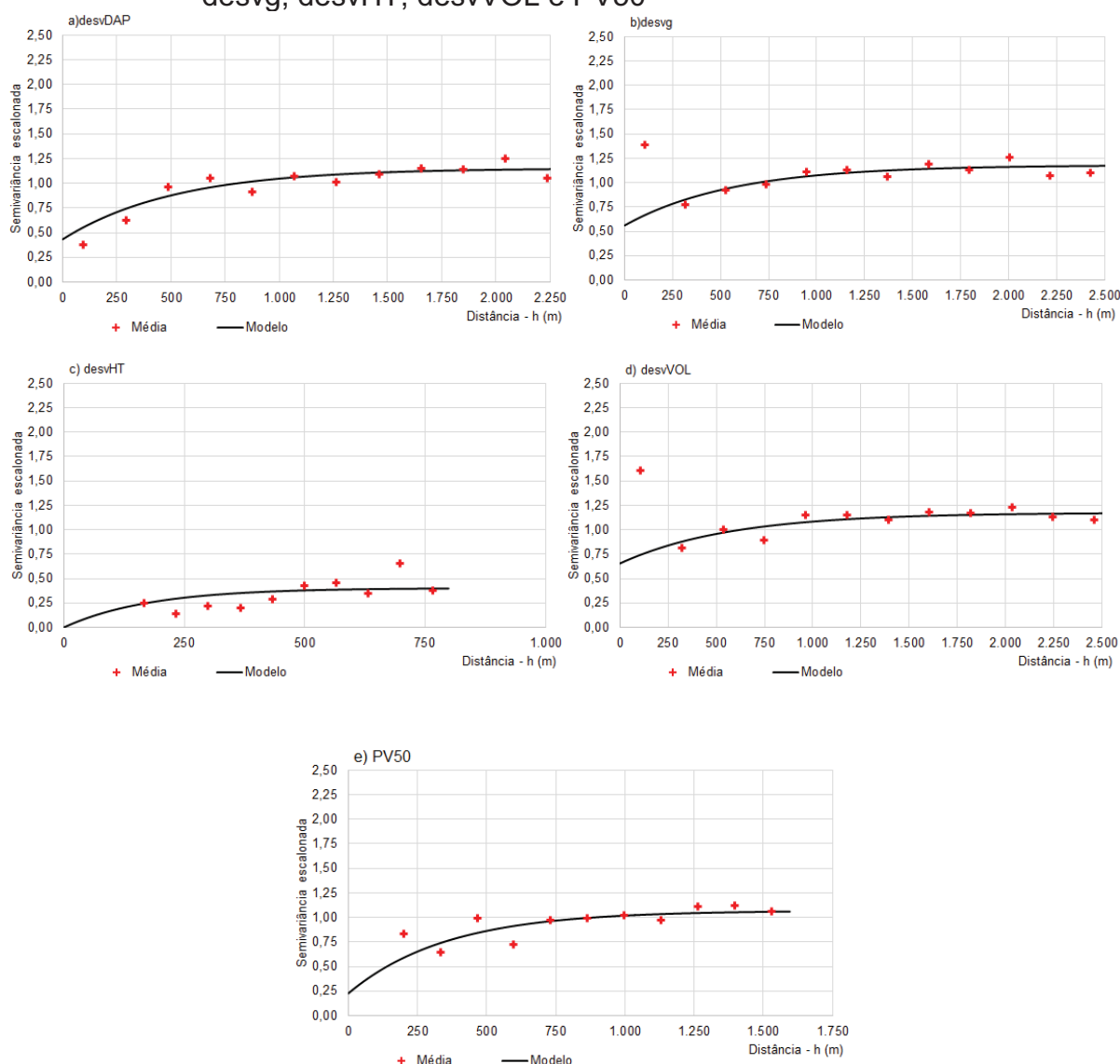
Variável	N	τ^2	σ^2	$(\tau^2 + \sigma^2)$	ϕ (m)	DE (%)	Modelo
desvDAP	91	0,151865	0,251900	0,403765	1557,48	62,39	Exponencial
desvHT	91	0,160546	0,045095	0,205642	3802,91	21,93	Exponencial
desvg	91	0,000002	0,000002	0,000004	1687,61	52,48	Exponencial
desvVOL	91	0,000317	0,000250	0,000567	1713,19	44,15	Exponencial
PV50	91	5,439880	20,127770	25,567650	1063,88	78,72	Exponencial

FONTE: O autor (2018).

Em que: N = número de observações; desvDAP = desvio padrão do diâmetro à altura do peito (cm); desvHT = desvio padrão para a altura total (m); desvg = desvio padrão para a área transversal (m^2); desvVOL desvio padrão para o volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$); PV50 = índice de uniformidade; τ^2 = efeito pepita; σ^2 = variação estruturada; $(\tau^2 + \sigma^2)$ = patamar; ϕ = alcance, e DE (%) = dependência espacial em percentagem.

Os mapas da espacialização das variáveis desvDAP, desvg, desvVOL e PV50 podem ser observados nas Figuras 16, 17, 18 e 19, respectivamente. A espacialização da variável desvHT não foi realizada, pois a dependência espacial para esta variável foi considerada fraca, não sendo recomendada, portanto, a aplicação da análise geoestatística, uma vez que os dados se caracterizam como aleatórios.

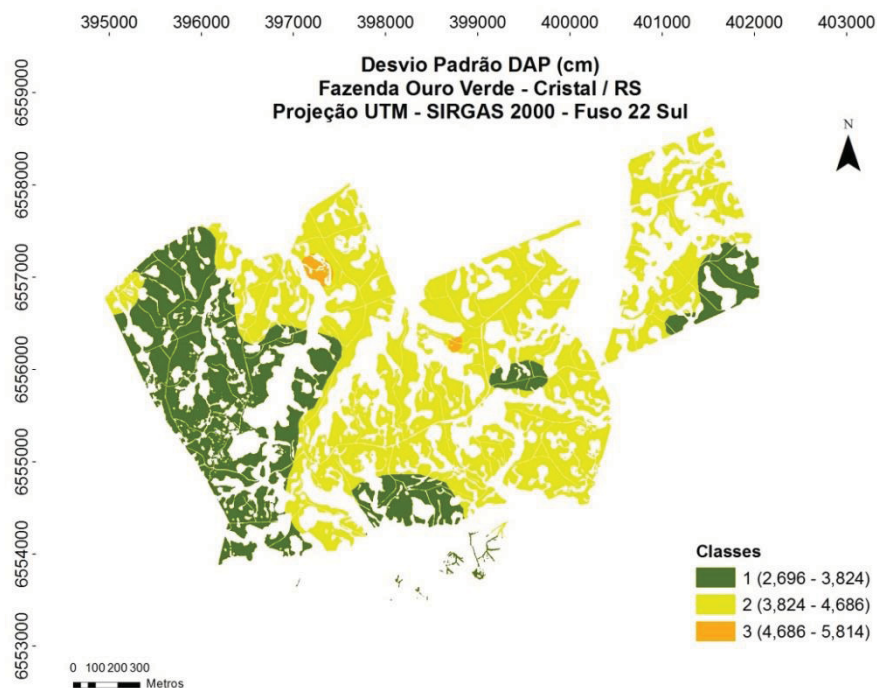
FIGURA 15. SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA AS VARIÁVEIS desvDAP, desvg, desvHT, desvVOL e PV50



FONTE: O autor (2018).

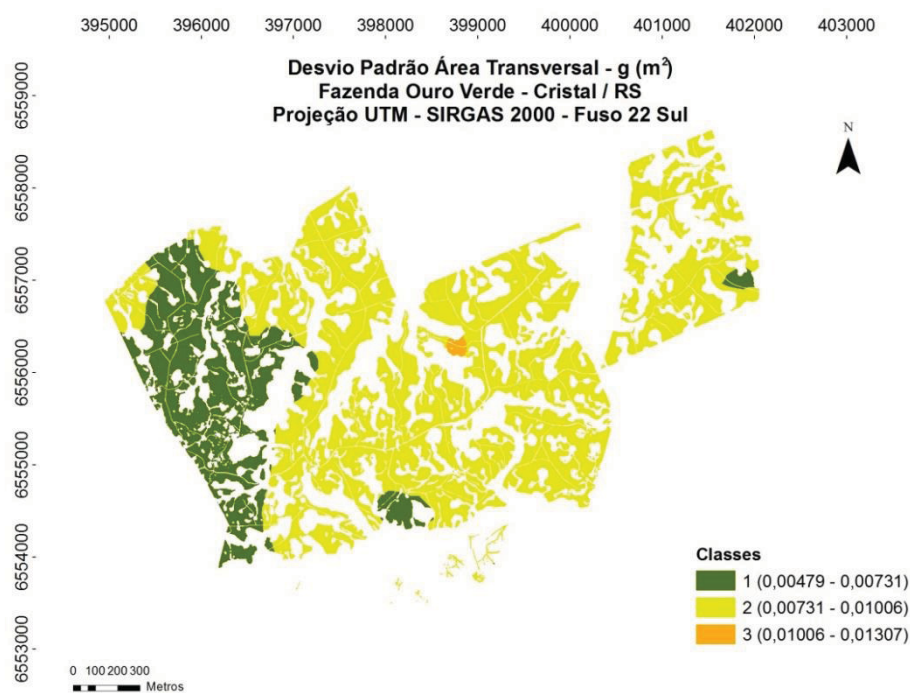
As variáveis desvDAP e desvg foram divididas em 3 classes, ou grupos de desvio, as classes para o desvDAP foram: I) 2,696 ┆ 3,824; II) 3,824 ┆ 4,686 e III) 4,686 ┆ 5,814, as classes para o desvg foram: I) 0,00479 ┆ 0,00731; II) 0,00731 ┆ 0,01006 e III) 0,01006 ┆ 0,01307. A variável desvVOL foi dividida em 2 classes de desvio: I) 0,05115 ┆ 0,073983 e II) 0,073983 ┆ 0,106702. O índice PV50 foi dividido em 3 classes, ou grupos de uniformidade: I) 14,119 ┆ 23,119; II) 10,113 ┆ 14,119 e III) 1,112 ┆ 10,113. Quanto menor o valor do desvio, menor é a variabilidade e maior é a homogeneidade dessas variáveis. Por outro lado, quanto maior o valor do PV50 maior é a uniformidade do volume, portanto, mais homogênea é a floresta.

FIGURA 16. ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL desvDAP EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA



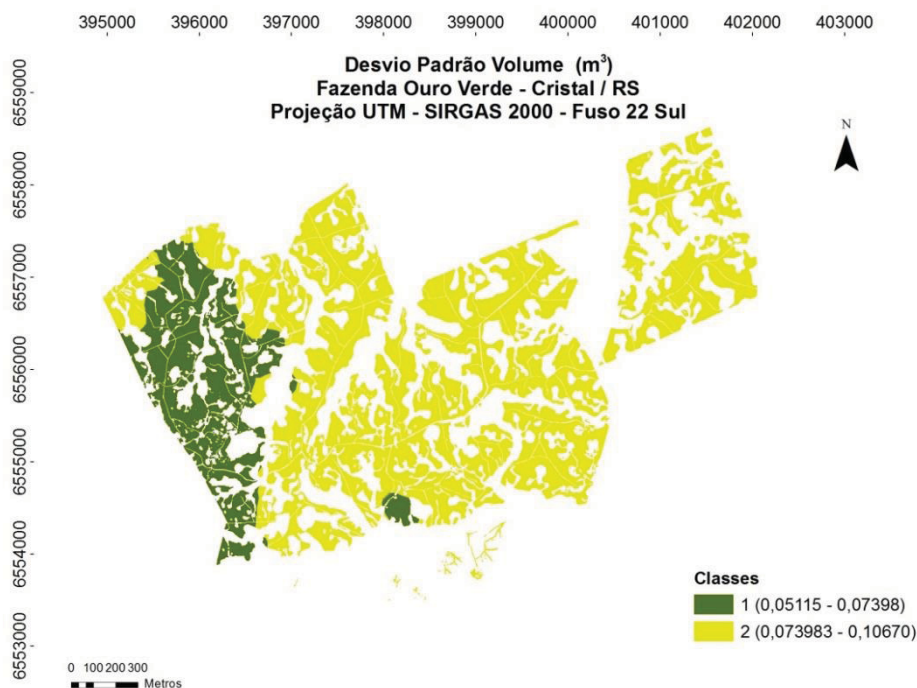
FONTE: O autor (2018).

FIGURA 17. ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL desvg EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA



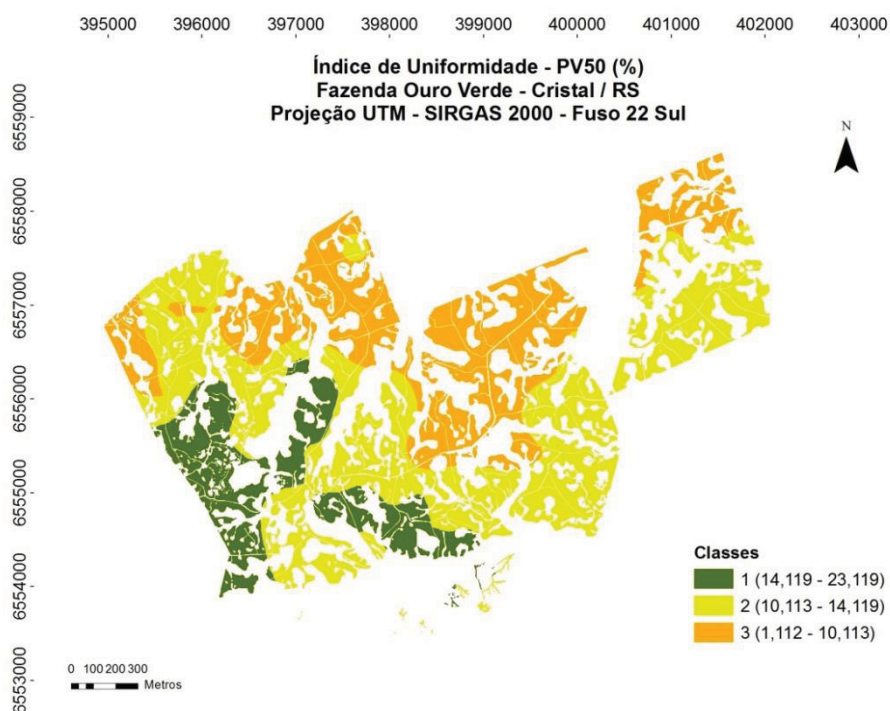
FONTE: O autor (2018).

FIGURA 18. ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL desvVOL EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA



FONTE: O autor (2018).

FIGURA 19. ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL PV50 EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA



FONTE: O autor (2018).

5.6.1 Variáveis do meio físico que determinam os grupos

Após a classificação das variáveis desvDAP, desvg, desvVOL e PV50 em grupos, ou classes, realizou-se a análise discriminante, visando determinar funções que permitam classificar as parcelas de inventário florestal dentro dos grupos para as quais apresentam maior probabilidade de pertencerem, bem como verificar a precisão da classificação. Os valores de *Lambda* de Wilks (λ^*), e as significâncias atingidas para as variáveis retidas na análise, obtidas pelo método *Backward*, podem ser visualizados na Tabela 23.

Para a variável desvDAP, foi selecionada somente 1 variável discriminante com real capacidade de discriminação, a argila, com 47,25 % de classificação correta. Para a variável desvg, também foi selecionada somente a argila como variável discriminante com real capacidade de discriminação, com 43,96 % de classificação correta. Já para o PV50, foram selecionadas duas variáveis discriminantes com real capacidade de discriminação, a altitude e o teor de matéria orgânica do solo, com 51,65 % de classificação correta. Para a variável desvVOL nenhuma variável discriminante foi selecionada, pois nenhuma alcançou nível de significância adequado, portanto, essa variável foi retirada da Tabela 23.

TABELA 23. ESTATÍSTICAS DO TESTE DE SELEÇÃO DE VARIÁVEIS DISCRIMINANTES PARA PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL

Variável de Classificação	Variável independente	Lambda de Wilks (λ^*)	Significância
desvDAP	Argila (%)	0,857895	0,0012*
Desvg	Argila (%)	0,897906	0,0088*
PV50	Altitude (m)	0,839927	0,0042*
	Matéria orgânica (% m.m ⁻¹)	0,944907	0,0260*

FONTE: O autor (2018).

Em que * = significativo ao nível de 95% de significância.

As funções discriminantes para as variáveis desvDAP, desvg e PV50 são apresentadas nas equações 38, 39 e 40, respectivamente.

$$\text{CLASSE (desvDAP)} = -20,4013 + 0,0233972 * \text{Argila} \quad (38)$$

$$\text{CLASSE (desvg)} = -19,2703 + 0,0221898 * \text{Argila} \quad (39)$$

$$\text{CLASSE (PV50)} = -16,0688 + 0,00141672 * \text{Altitude} + 0,121179 * \text{MO} \quad (40)$$

Em que:

MO = Matéria Orgânica do solo (%).

5.6.2 Espacialização dos atributos do meio físico que determinam os grupos

Após a análise discriminante foi possível identificar as variáveis com real capacidade de discriminação para desvDAP, desvg e PV50. A dependência espacial para cada atributo do meio físico foi calculada por meio dos parâmetros obtidos nos ajustes dos semivariogramas (Figura 20), em todos os casos o melhor modelo ajustado foi o exponencial. A argila, variável selecionada para a classificação das variáveis desvDAP e desvg obteve dependência espacial de 98,90%, dependência considerada forte. Para a altitude, a dependência espacial foi considerada forte, com 100% de dependência. A matéria orgânica do solo também foi classificada como dependência espacial forte, com 75,65%. As estimativas dos parâmetros do modelo exponencial ajustado às variáveis acima relacionadas podem ser observadas na Tabela 24.

TABELA 24. ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DO MODELO EXPONENCIAL AJUSTADOS ÀS VARIÁVEIS ARGILA, ALTITUDE E MATÉRIA ORGÂNICA

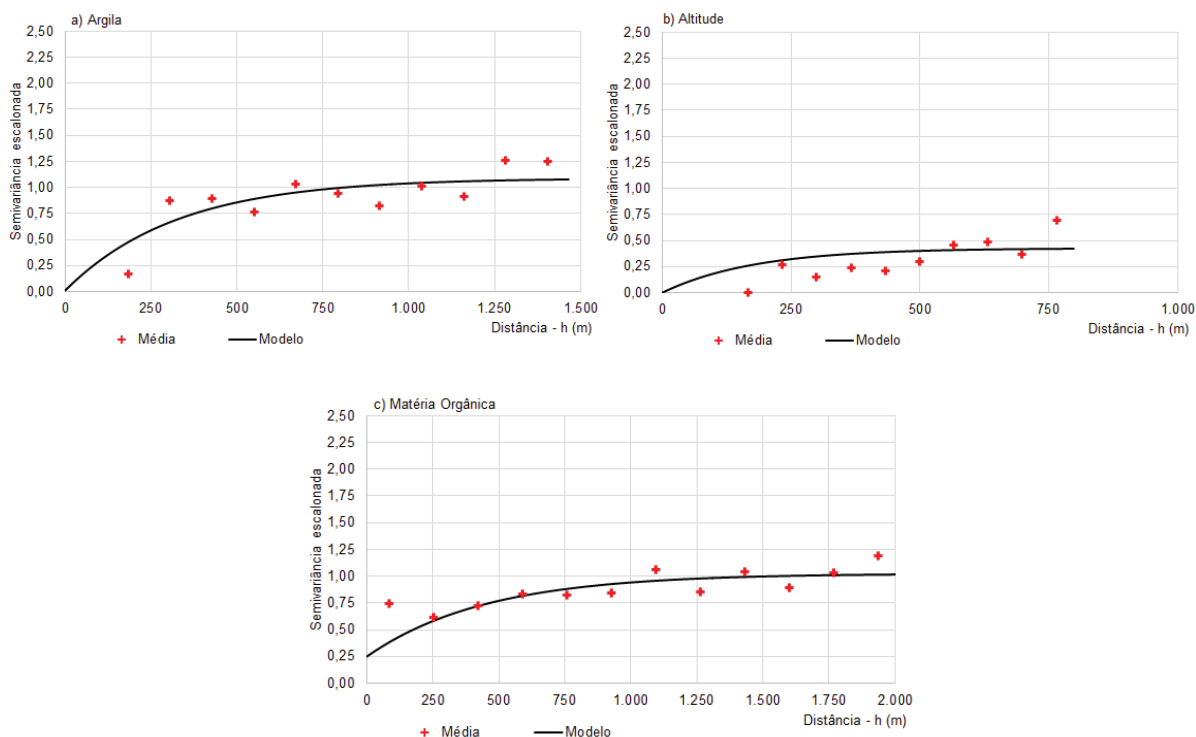
Variável	N	τ^2	σ^2	$(\tau^2 + \sigma^2)$	ϕ (m)	DE (%)	Modelo
Argila	91	0,096440	8,658248	8,754688	976,93	98,90	Exponencial
Altitude	91	0,000000	264,230800	264,230800	523,50	100,00	Exponencial
MO	91	0,028321	0,088004	0,116326	1346,67	75,65	Exponencial

FONTE: O autor (2018).

Em que: N = número de observações; MO = matéria orgânica do solo; τ^2 = efeito pepita; σ^2 = variação estruturada; $(\tau^2 + \sigma^2)$ = patamar; ϕ = alcance, e DE (%) = dependência espacial em percentagem.

Os mapas da espacialização das variáveis argila, altitude e matéria orgânica podem ser observados nas Figuras 21, 22 e 23, respectivamente.

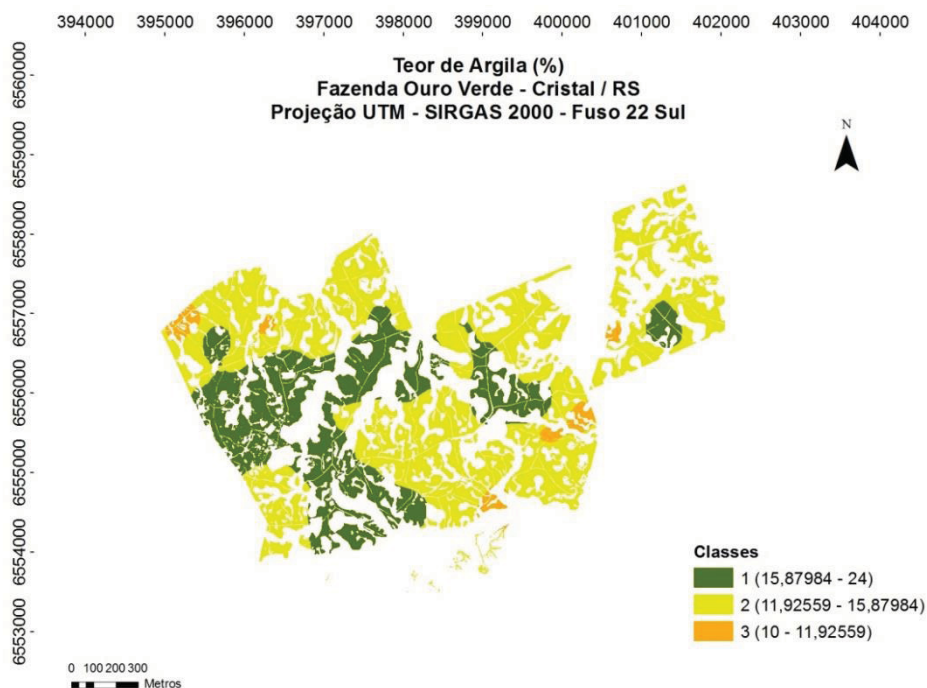
FIGURA 20. SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA AS VARIÁVEIS ARGILA, ALTITUDE E MATÉRIA ORGÂNICA



FONTE: O autor (2018).

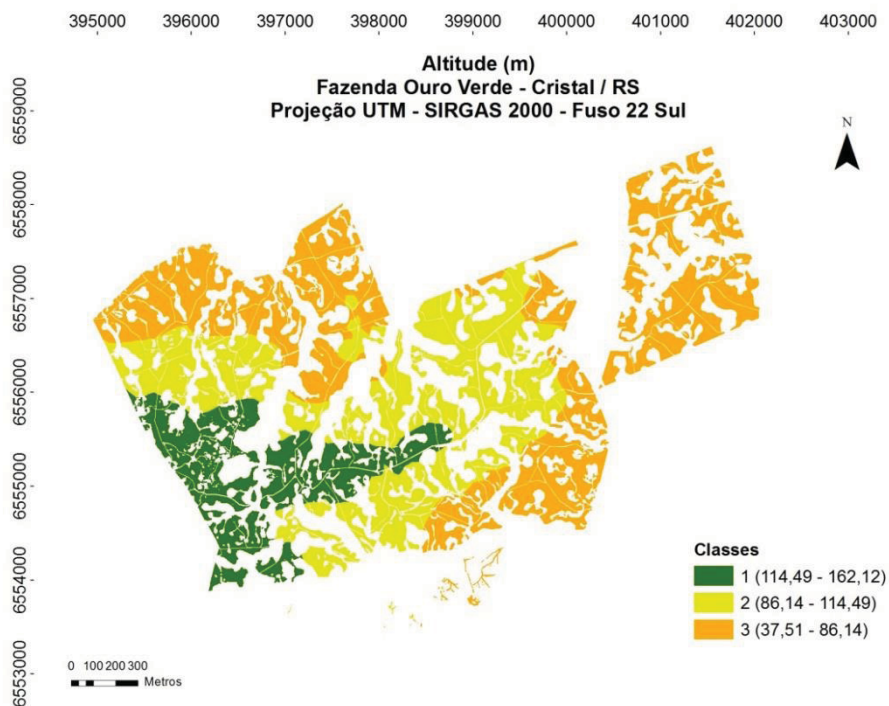
As variáveis argila, altitude e matéria orgânica foram também divididas em 3 classes. As classes para a argila foram: I) 15,87984 ┘ 24; II) 11,92559 ┘ 15,87984; e III) 10 ┘ 11,92559. As classes para a altitude foram: I) 114,49 ┘ 162,12; II) 86,14 ┘ 114,49 e III) 37,51 ┘ 86,14. Já a matéria orgânica foi dividida nas seguintes classes: I) 1,762 ┘ 2,35; II) 1,313 ┘ 1,762 e III) 0,97 ┘ 1,313.

FIGURA 21. ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL ARGILA EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA



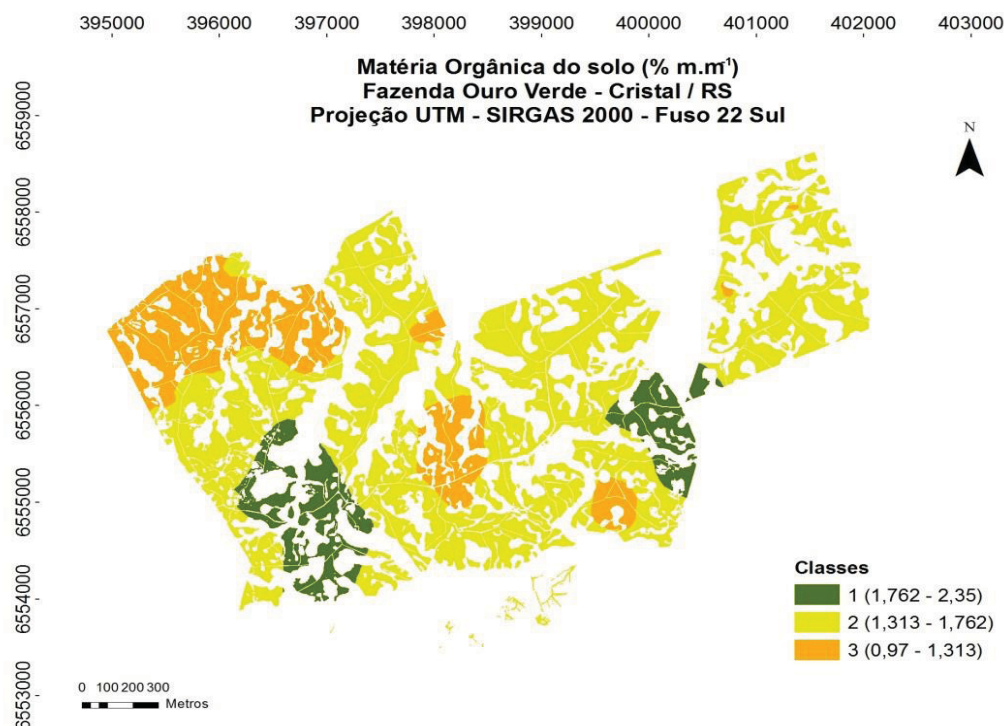
FONTE: O autor (2018).

FIGURA 22. ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL ALTITUDE EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA



FONTE: O autor (2018).

FIGURA 23. ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL MATÉRIA ORGÂNICA EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA



FONTE: O autor (2018).

A argila tem efeito negativo em relação às variáveis desvDAP e desvg , com correlações espaciais de $-0,298$ e $-0,265$, respectivamente. Embora essas correlações sejam de baixa magnitude, nota-se que há uma tendência em solos com maiores teores de argila apresentarem menores desvios padrões, ou seja, menor variabilidade e maior homogeneidade para essas variáveis. Carvalho et al. (1999), estudando a influência das características do solo no crescimento de *Pinus taeda* por meio de técnicas estatísticas multivariadas, concluíram que o teor de argila do solo foi determinante para estabelecer as classes de sítio para o povoamento em questão. Behling (2014), estudando a relação entre os atributos químicos do horizonte superficial do solo com a área foliar para acácia-negra, encontrou correlação fraca e negativa entre o teor de argila e a área foliar (0,25), sendo a área foliar uma variável do indicativo de produtividade. Esse mesmo autor encontrou forte correlação entre os teores de argila e os de alumínio e com a acidez potencial do solo, elementos que são considerados prejudiciais para o crescimento das plantas.

A altitude e a matéria orgânica têm efeitos positivos em relação ao índice de uniformidade PV50, com correlações espaciais de $0,367$ e $0,263$, respectivamente.

Essas correlações também sugerem que exista uma tendência em que em regiões mais altas e com maiores concentrações de matéria orgânica a uniformidade do volume seja maior, portanto, são regiões em que as florestas são mais homogêneas. De acordo com Schober (1949) citado por Assmann (1970), plantios localizados em maiores altitudes tendem a iniciar seu crescimento mais tardiamente no ano vegetativo e apresentar maior duração do período de crescimento ao longo do ano. A matéria orgânica tem efeitos benéficos sobre as propriedades físicas e químicas do solo. Entre eles, cabe destacar o fornecimento de formação de agregados, aumento da capacidade de retenção de água e de troca catiônica e favorece a disponibilização de N, P e S, através do processo de mineralização (SALAS, 1987).

Rufino et al. (2006), estudando a relação entre variáveis dendrométricas de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e atributos do solo, não observaram uma boa correlação entre os mapas de krigagem das variáveis do solo e das variáveis dendrométricas.

5.7 UNIDADES DE MANEJO PARA ACÁCIA-NEGRA

No presente estudo, as Unidades de Manejo para acácia-negra podem ser aplicadas no estudo da relação entre o índice de uniformidade (baseado no PV50) e atributos do meio físico (altitude e matéria orgânica do solo). O estudo mostrou que há uma tendência em locais onde a altitude e o teor de matéria orgânica são maiores apresentarem maiores valores para o PV50, esses locais são considerados locais mais uniformes, onde a floresta é mais homogênea, ou seja, árvores com volumes mais homogêneos, com menores índices de mortalidade e menores percentagens de falhas de plantio. Os resultados alcançados pelo modelo geoestatístico exponencial permitiu visualizar o comportamento do PV50, possibilitando definir a espacialização de três Unidades de Manejo diferenciadas para acácia-negra, de acordo com as classes de PV50. São elas: Classe I (14,119 ─ 23,119), Classe II (10,113 ─ 14,119) e Classe III (1,112 ─ 10,113).

Segundo Daniel, Helms e Baker (1979), a textura, profundidade e localização topográfica (altitude) são atributos físicos que não podem ser modificados, exceto por meio da erosão. A estrutura, porosidade e conteúdo de matéria orgânica podem ser modificados através de práticas silviculturais. Diante

disso, a prática mais usual, econômica e indicada é deixar os resíduos da colheita nos talhões para que a matéria orgânica seja incorporada ao solo. No entanto, a empresa, obedecendo a Lei Estadual do Rio Grande do Sul 9482/1991, realiza a queima dos resíduos da colheita, visando eliminar larvas do cascudo serrador (*Oncideres* spp). Essa prática pode reduzir o suprimento de matéria orgânica ao solo, com consequências negativas sobre a produtividade florestal em médio e longo prazo. Uma alternativa de adubação para incorporação de matéria orgânica é a utilização de resíduos orgânicos tais como os dejetos líquidos de suínos e cama de frango (biofertilizantes). Os dejetos suínos e a cama de frango podem constituir fertilizantes eficientes e seguros, sendo alternativas para diminuição do custo e para a sustentabilidade ambiental.

Sob o ponto de vista do manejo florestal, sobretudo do inventário florestal, o estabelecimento das Unidades de Manejo por meio do PV50 fornece subsídios para o planejamento do inventário, pois a estratificação do povoamento florestal em sub-áreas homogêneas permite direcionar um determinado método ou processo de amostragem a ser empregado em futuras remediações. Portanto, a espacialização do índice PV50 permite a realização da estratificação da floresta em subpopulações homogêneas, possibilitando que haja a alocação de unidades amostrais em intensidades ideais para a obtenção de estimativas mais precisas a custos reduzidos.

6 CONCLUSÕES

- ✓ Os resultados alcançados pelo modelo geoestatístico exponencial permitiu visualizar o comportamento do PV50, possibilitando definir a espacialização de três Unidades de Manejo diferenciadas para acácia-negra, de acordo com as classes de PV50;
- ✓ Para a variável desvHT, a dependência espacial foi considerada fraca. Para as variáveis desvDAP, desvg e desvVOL, a dependência espacial foi classificada como fraca. Já o índice de uniformidade PV50, a dependência espacial foi classificada como forte;
- ✓ A espacialização da variável desvHT não foi realizada, pois a dependência espacial para esta variável foi considerada fraca, não sendo recomendada, portanto, a aplicação da análise geoestatística uma vez que os dados se caracterizam como aleatórios;
- ✓ As variáveis desvDAP e desvg foram divididas em três classes, ou grupos de desvio. A variável desvVOL foi dividida em duas classes de desvio. O índice PV50 foi dividido em três classes, ou grupos de uniformidade. Quanto menor o valor do desvio, menor é a variabilidade e maior é a homogeneidade dessas variáveis. Por outro lado, quanto maior o valor do PV50 maior é a uniformidade do volume, portanto, mais homogênea é a floresta;
- ✓ Para as variáveis desvDAP e desvg, foi selecionada a argila como variável com real capacidade de discriminação. Para o PV50, foram selecionadas duas variáveis discriminantes com real capacidade de discriminação, a altitude e o teor de matéria orgânica do solo. Para a variável desvVOL não foi selecionada nenhuma variável discriminante, pois nenhuma alcançou nível de significância adequado;
- ✓ As variáveis de posicionamento das parcelas não apresentaram correlações significativas, pelo teste t , com o \overline{DAP} , \overline{HT} , HDOM, IS_7, V e G. Isto indica que, para as circunstâncias avaliadas, as variáveis de posicionamento não foram capazes de explicar as diferenças nessas variáveis para a espécie;

- ✓ As variáveis granulométricas do solo não apresentaram correlação significativa, pelo teste t , com o \overline{DAP} , \overline{HT} , \overline{HDOM} , $\overline{IS_7}$, \overline{V} e \overline{G} . Apontando que, para as circunstâncias avaliadas, as variáveis granulométricas não foram capazes de explicar as diferenças nessas variáveis para a espécie;
- ✓ Não foi possível estabelecer relações para a maior parte das variáveis químicas analisadas. Para as variáveis dependentes \overline{DAP} , \overline{HT} , \overline{V} e \overline{G} a única variável do solo que apresentou correlação significativa foi o pH (água). Para a variável dependente \overline{HDOM} , a única variável do solo que apresentou correlação significativa foi a \overline{MO} . Do conjunto de variáveis químicas analisadas apenas a matéria orgânica apresentou coeficiente de correlação total significativa com o Índice de Sítio ($\overline{IS_7}$). No entanto, não se pode afirmar que há uma influência direta do teor de matéria orgânica na produtividade da acácia negra, havendo somente uma tendência de caráter geral de que possa influenciar o crescimento desta espécie;
- ✓ A variável do Índice de Sítio aos 7 anos de idade apresentou média de 19,36 m, com amplitude variando de 16,88 a 22,21 m. Nesta idade índice, foi possível obter a divisão em 3 classes de sítio;
- ✓ Não foi possível explicar as variações no Índice de Sítio para a acácia-negra com o ajuste da regressão utilizando os escores dos 7 primeiros componentes principais. Dentre todas as 29 variáveis originais analisadas para compor o modelo preditivo, através do processo *stepwise*, somente a matéria orgânica do solo obteve significância estatística, mantendo relação negativa com o crescimento da acácia-negra. No entanto, a equação ajustada não foi capaz de explicar variações no Índice de Sítio para a acácia-negra;
- ✓ A dependência espacial para a variável Índice de Sítio, aos 7 anos de idade, foi considerada fraca. Portanto, a aplicação da análise geoestatística não é recomendada, pois na análise geral do desempenho do semivariograma, a ocorrência da dependência espacial fraca ou nula caracteriza a aleatoriedade dos dados, não justificando a modelagem geoestatística para essa variável;
- ✓ A melhor combinação para a reunião das parcelas de inventário florestal em grupos homogêneos, em relação às variáveis \overline{DAP} , \overline{HT} , \overline{HDOM} , $\overline{IS_7}$,

V e G, foi encontrada utilizando a distância Euclidiana e o Método *Average Linkage*, permitindo a divisão do dendrograma em três grupos;

7 RECOMENDAÇÕES

Sugere-se que sejam realizadas análises das características físico-hídricas no solo da região de estudo na tentativa de estabelecer relações com a produtividade florestal, tais como: densidade do solo, porosidade total do solo, micro e macroporosidade do solo, capacidade de campo, retenção de umidade, ponto de murcha permanente, drenagem interna, capacidade de armazenamento de água, retenção de água disponível, etc. Outras variáveis importantes são: a penetrabilidade do solo, estado de agregação do solo, aeração do solo, capacidade de armazenamento de oxigênio, entre outras.

Diante das dificuldades e limitações em estabelecer relações entre o potencial produtivo da espécie e atributos do meio físico por meio da estatística multivariada, que se baseia somente na relação linear entre as variáveis, sugere-se uma abordagem alternativa para a modelagem das variáveis que exprimem o potencial produtivo da floresta. Uma alternativa consiste no uso de inteligência artificial (IA). Em alguns casos, as RNA têm apresentado desempenho superior aos modelos de regressão devido a diversos fatores, como: estrutura maciça e paralelamente distribuída (camadas), habilidade de aprender e generalizar, capazes de resolver problemas complexos, são tolerantes a falhas e ruídos, podem modelar diversas variáveis e suas relações não lineares, possibilidade de modelagem com variáveis categóricas, além das numéricas.

Recomenda-se a instalação de parcelas permanentes e tomar-se medidas anuais de alturas dominantes e co-dominantes, trabalhar também com a análise do Incremento Médio Anual (IMA), com vista a observar o comportamento futuro da espécie.

REFERÊNCIAS

- AHRENS, S.; HOLBERT, D. Uma função para forma de tronco e volume de *Pinus taeda* L. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, n.3, p. 37-68, 1981.
- ÁLVARES, C.A.; GONÇALVES, J.L.M.; SILVA, C.R.; FRANCISCATTE, W.; NASCIMENTO, L.A. Geoestatística aplicada ao estudo da produtividade e qualidade de plantações florestais. In: Simpósio de Geoestatística Aplicada em Ciências Agrárias, 1, 2009, Botucatu, **Anais...Botucatu**, 2009.
- ANDRADE, G.C.; SILVA, H.D. da; BELLOTE, A.F.J.; FERREIRA, C.A. Aplicação de resíduo de celulose no crescimento de *Eucalyptus dunnii*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, n. 47, jul/dez. 2003.
- ANGELICO, J.C. Desempenho de cokrigagem na determinação da variabilidade de atributos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 931-936, 2006.
- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study** – Studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands. Oxford: Pergamon Press, 1970.
- ASSUMPÇÃO, R.A.B.; URIBE-OPAZO, M.A.; GODOY, E.; JOHANN, J.A. Uso da krigagem indicatriz na avaliação da probabilidade da produtividade de soja segundo os padrões regional, estadual e nacional. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 29, n. 1, p. 165-171, 2007.
- AUER, C.G.; SILVA, R. Fixação de nitrogênio em espécies arbóreas. In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSI, M.; NEVES, M.C.P. **Microbiologia do solo**. Campinas: Universidade Estadual de São Paulo, 1992. p. 160-167.
- BAGNARA, F. PRIETTO, P.D.M.; TIMBOLA, R.S. Aplicação da krigagem ordinária na modelagem do ph e da dureza da água subterrânea na área central de Passo Fundo – RS. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 20, p. 15-22, 2012.
- BARBOSA, C.E.M.; FERRARI, S.; CARVALHO, M. DE P.; PICOLI, P.R.F.; CAVALLINI, M.C.; BENETT, C.G.S.; DOS SANDOS, D.M.A. Inter-relação da produtividade de madeira do *Pinus* com atributos físico-químicos de um latossolo do cerrado brasileiro. **Revista Árvore**, v. 36, n. 1, p. 25-35, 2012.
- BARICHELO, L.R.; SCHUMACHER, M.V.; MUNARI, L.V. Quantificação da biomassa de um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild. na região sul do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 2, p. 129-135, 2005.
- BARNES, R.L.; RALSTON, C.W. Soils factors related to growth and yield of slash pine plantations. **Florida Agricultural Experiment Station bulletin**, v. 559, p. 1-23, 1955.
- BARRETO, T.G. **Geoestatística aplicada à modelagem da dinâmica de crescimento e características químicas do solo de um fragmento florestal**. 187 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2015.

BARROSO, L.P.; ARTES, R. Análise Multivariada. In: 10° Simpósio de estatística aplicada à experimentação / 48° Reunião anual da região brasileira da sociedade internacional de biometria, 2003. Lavras, **Anais...Lavras**, 151 p.

BARTLETT, M.S. Tests of significance in factor analysis. **British Journal of Psychology**, v. 3, n. 2, p. 77-85, 1950.

BEHLING, A. **A produção de biomassa e o acúmulo de carbono em povoamentos de acácia negra em função de variáveis bioclimáticas**. 161 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2014.

BILA, J.M. **Classificação de sítios com base em fatores edáficos para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região de Prata, Minas Gerais**. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2010.

BINKLEY, D.; O'CONNELL, A.M.; SANKARAN, K.V. Stand development and productivity. In: NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A.G. (Ed). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR, 1997. p. 419-442.

BINKLEY, D.; STAPE, J.; RYAN, M. Thinking about resource use efficiency in forests. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 5-16, 2004.

BOGNOLA, I.A. **Unidades de manejo para *Pinus taeda* L. no planalto norte catarinense, com base em características do meio físico**. 141 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2007.

BOLAND, D.J.; BROOKER, M.I.H.; MCDONALD, M.W. Black Wattle. In: **Forest trees of Australia**. Melbourne: Thomas Nelson/CSIRO, 1984. p. 162-163.

BURROUGH, P.A.; BOUMA, J.; YATES, S.R. The state of the art in pedometrics. **Geoderma**, v. 26, n. 1/3, p. 311-326, 1994.

CALDEIRA, M.V.W.; SCHUMACHER, M.V.; SANTOS, E.M.; TEDESCO, N.; PEREIRA, J.C. Estimativa do conteúdo de nutrientes em um povoamento jovem de *Acacia mearnsii* De Wild. estabelecido na região sul do Brasil. **Revista Floresta**, v. 29, n.1/2, p. 53-65, 1999.

CALDEIRA, M.V.W.; SCHUMACHER, M.V.; SCHEEREN, L.W.; BARICHELLO, L.R.; WATZLAWICK, L.F. Relação hipsométrica para *Acacia mearnsii* com diferentes idades. **Boletim Pesquisa Florestal**, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, n. 45, 2002.

CALDEIRA, M.V.W.; RONDON, R.M.; SCHUMACHER, M.V. Eficiência do uso de micronutrientes e sítio em três procedências de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Revista Árvore**, v. 28, n. 1, p. 39-47, 2004.

CAMARGO, E.C.G. Geoestatística: Fundamento e Aplicações. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. **Geoprocessamento em Projetos Ambientais**. 2 ed. São José dos Campos: INPE. 1998. 36 p.

CAMARGO, E.C.G. Análise espacial de superfícies por Geoestatística. In: FUKS, S.D.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. (Ed.). **Análise Espacial de Dados Geográficos**. p. 1-28, 2011.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 1501-1511, 1994.

CAPELLI, N.L. **Agricultura de precisão** – Novas tecnologias para o processo produtivo. 2004. Disponível em: < <http://www.bases.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 13 de janeiro 2018.

CARMO, D.N.; RESENDE, M.; SILVA, T.C.A. Avaliação da aptidão das terras para eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (Ed.). **Relação Solo-Eucalipto**. Viçosa, Folha de Viçosa, p. 187-235, 1990.

CARVALHO, S.P. de. **Métodos alternativos de estimação de coeficientes de trilha e índices de seleção, sob multicolinearidade**. Viçosa: UFV, 1995. 163 p.

CARVALHO, C.G.P.de. OLIVEIRA, V.R.; CRUZ, C.D.; CASALI, V.W.D. Análise de trilha sob multicolinearidade em pimentão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 4, p. 603-613, 1999.

CARVALHO, A.P.; MENEGOL, O.; OLIVEIRA, E.B.; MACHADO, S.A.; POTTER, R.O.; FASOLO, P.J.; FERREIRA, C.A.; BARTOSZECK, A.C.P.S. Efeitos de características do solo sobre a capacidade produtiva de *Pinus taeda*. **Boletim Pesquisa Florestal**, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, n. 39, P. 51-66, 1999.

CHERUBIN, M.R.; SANTI, A.L.; BASSO, C.J.; EITELWEIN, M.T.; VIAN, A.L. Caracterização e estratégias de manejo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo utilizando a análise dos componentes principais. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 13, p. 196-210.

CLUTTER, J.L.; FORTSON, J.C.; PIENAR, L.V.; BRISTER, G.H.; BAILEY, R.L. **Timber management: a quantitative approach**. New York, John Willey e Sons, 1983. 333p.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Recomendação de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3 ed. Passo Fundo: SBCS – Núcleo Regional Sul, 1994.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre: SBCS – Núcleo Regional Sul, 2004.

COPELAND, O.L. Soil-Site index studies of western White Pine in the Northern Rocky Mountain Region. **Soil Science Society of America proceedings**, v. 22, n. 3, p. 268-269, 1958.

COSTA, L.M.; COSTA, O.V.; OLSZEWSKI, N.; NACIF, P.G.S. Influência das características morfológicas, estruturais e texturais do solo na definição do seu preparo. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed.). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: Brasil, p. 207-219, 2002.

COUTO, E.G.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de micronutrientes em solos sob pivô central no sul do Estado do Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 12, p. 2321-2329, 1999.

CRUZ, D.C.; REGAZZI, A.J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, 1994. 390 p.

CRUZ, C.D.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, 2003. 579 p.

CUNHA NETO, F.R.; SCOLFORO, J.R.S.; OLIVEIRA, A.D.de; CALEGARIO, N.; KANEGAE JUNIOR, H. Uso da diferença algébrica para construção de curvas de sítio para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* na região de Luiz Antônio, SP. **Revista Cerne**, v. 2, n. 2, p. 119-141, 1996.

DA SILVA, F.; PIMENTEL, A.; CORTE, A.P.D.; SANQUETTA, C.R. Classificação de sítio para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região do Triângulo Mineiro. **Revista Acadêmica**, v. 11, n. 1, p. 105-112, 2013.

DANIEL, T.W.; HELMS, J.A.; BAKER, F.S. **Principles of silviculture**. 2. Ed. New York: McGraw-Hill, 1979.

DEDECEK, R.A.; HIGA, R.C.V. Cultivo da Acácia-negra. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. Versão eletrônica. Disponível em <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/AcaciaNegra/CultivodaAcaciaNegra/index.htm>> Acesso em 29 Jun. 2017.

DEDECEK, R.A.; CURCIO, G.R.; RACHWAL, M.F.G.; SIMON, A.A. Efeitos de sistemas de preparo do solo na erosão e na produtividade da acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild). **Ciência Florestal**, v. 17, n. 3, p. 205-215, 2007.

DIAS, S.S.; FERREIRA, A.G.; GONÇALVES, A.C. Definição de Zonas de Aptidão para Espécies Florestais com Base em Características Edafo-climáticas. **Silva Lusitana**, n. especial, p. 17-35, 2008.

DOLDAN, M.E.Q. **Desenvolvimento da altura dominante de *Pinus taeda* L., como resposta aos estímulos dos fatores do meio na região de Ponta Grossa-PR**. 119 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, PR, 1987.

DONKIN, M.L. A multivariate reappraisal of a site evaluation study in *Acacia mearnsii* De Wild. **South African Forestry Journal**, n. 169, p. 1-10, 1994.

DORMANN, C.F. Effects of incorporating spatial autocorrelation into the analysis of species distribution data. **Global Ecology and Biogeography**, v. 16, n. 2, p. 129-138, 2007.

DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CAMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004, p. 230.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. **Caracterização do desenvolvimento e produção de madeira da *Acacia mearnsii* aos 3 e 5 anos de idade em solos derivados de micaxistos no município de Piratini, RS**. Colombo: Embrapa Florestas, 1997. 10 p. Comunicado Técnico 26.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 286 p.

FARACO, M.A.; URIBE-OPAZO, M.A.; SILVA, E.A.A. DA.; JOHANN, J.A.; BORSSOI, J.A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 463-476, 2008.

FERREIRA, C.A.; COUTO, H.T.Z. A influência de variáveis ambientais no crescimento de espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. **Boletim da Pesquisa Florestal**, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, n. 3, 9-35. 1981.

FINGER, C.A.G. Curvas de altura-diâmetro de Acácia negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Ciência Rural**, v. 30, n. 3, p. 387-391, 2000.

FINGER, C.A.G. **Distribuição de diâmetros em acácia negra, *Acacia mearnsii* De Wild., em diferentes povoamentos e idades**. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1982.

FOWLER, J.A.P.; CURCIO, G.R.; RACHWAL, M.F.G.; DEDECEK, R.A.; SIMON, A.A. Germinação e vigor de sementes de *Acacia mearnsii* De Wild coletadas em diferentes povoamentos do Estado do Rio Grande do Sul. **Comunicado Técnico**. Colombo: EMBRAPA – CNPF, n. 39, p. 1-4, 2000.

GAMA-RODRIGUES, E.F.; BARROS, N.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciências do solo**, v. 29, n. 6, p. 893-901, 2005.

GELSOMINO, A.; BADALUCCO, L.; AMBROSOLI, R.; CRECCHIO, C.; PUGLISI, E.; MELI, S.M. Changes in chemical and biological soil proprieties as induced by anthropogenic disturbance: A case study of an agricultural soil under recurrent flooding by wastewaters. **Soil Biology Biochemistry**, v. 38, n. 8, p. 2069-2080, 2006.

GHOLZ, H.; LIMA, W. The ecophysiological Basis for Productivity in the Tropics. In: NAMBIAR, E.; BROWN, A. **Management of Soil Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests**. Canberra: ACIAR, 1997. p. 213-246.

GOMES, J.B.V.; CURI, N.; MOTTA, P.E.F.; KER, J.C.; MARQUES, J.J.G.S.M.; SCHULZE, D.G. Análise de componentes principais de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 137-153, 2003.

GOMES, N.M.; SILVA, A.M. DA; MELLO, C.R. DE; FARIA, M.A. DE; OLIVEIRA, P.M. DE. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 435-443, 2007.

GONCALVES, J.L.M. Interpretação de levantamento de solo para fins silviculturais. **Boletim de Pesquisa IPEF**, n. 39, p. 65-72, 1988.

GONÇALVES, J.L.M.; DEMATTÊ, J.L.I.; COUTO, H.T.Z. Relações entre a produtividade de sítios florestais de *P. taeda* e *Pinus elliottii* com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no Estado de São Paulo. **Boletim Técnico IPEF**, n. 43/44, p. 24-39, 1990.

GONÇALVES, J.L.M. Principais solos usados para plantações florestais. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed.). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: Brasil, p. 3-45, 2002a.

GONÇALVES, J.L.M. Conservação do solo. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed.). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: Brasil, p. 49-129, 2002b.

GONÇALVES, J.L. DE M.; ALVARES, C.A.; GONÇALVES, T.D.; MOREIRA, R.M.; MENDES, J.C.T.; GAVA, J.L. Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*, com uso de sistema de informação geográfica. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 94, p. 187-201, 2012.

GOWER, D.A. A general coefficient of similarity and some of its properties. **Biometrics**, v. 27, n. 4, p. 857-872, 1971.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade especial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 29, n. 2, p. 169-177, 2005.

GREY, J.M.; BRANDI, R.M.; CÂNDIDO, J.F.; OLIVEIRA, L.M. Competição de espécies e procedências de eucalipto na região de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 1, n. 2, p. 72-88, 1977.

GUEDES, M.C.; ANDRADE, C.A.; POGGIANI, F.; MATTIAZZO, M.E. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 267-280, 2006.

GUERRA, P.A.G. **Geoestatística operacional**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1988, 145 p.

GUIMARÃES, E.C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo vermelho escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional**. 85 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade de Campinas, Campinas, 2000.

HAIG, I.T. **Colloidal content and related soil factors as indicators of site quality**. New York, Yale University, 1929. 33 p.

HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2005. 721 p.

HAKAMADA, R.E.; STAPE, J.L.; DE LEMOS, C.C.Z.; ALMEIDA, A.E.A.; SILVA, L.F. Uniformidade entre árvores durante uma rotação e sua relação com a produtividade em *Eucalyptus* clonais. **Revista Cerne**, v. 21, n. 3, p. 465-472, 2015.

HERBERT, M.A. Fertilisation of trees at planting. In: MacLENNAM, L. (Ed.). **Annual research report**. Pietermaritzburg: Institute For Commercial Forestry Research, 1991. p. 81-91.

HIGUCHI, P.; DA SILVA, A.C.; FERREIRA, T.S.; DE SOUZA, S.T.; GOMES, J.P.; DA SILVA, K.M.; DOS SANTOS, K.F.; LINKE, C.; PAULINO, P.S. Influência de variáveis ambientais sobre o padrão estrutural e florístico do componente arbóreo, em um fragmento de floresta ombrófila mista montana em Lages, SC. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 1, p. 79-90, 2012.

HÖCK, B.K.; PAYN, T.W.; SHIRLEY, J. Using a geographic information system and geostatistics to estimate site index of *Pinus radiata* for Kaingaroa. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 23, n. 3, p. 264-277, 1998.

HOTELLING, H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. **Journal of Education Psychology**, v. 24, n. 6, p. 417-441, 1933.

HOTELLING, H. Simplified calculation of principal components. **Psychometrika**, v. 1, n. 1, p. 27-35, 1936.

HUNTER, I.R.; GIBSON, A.R. Predicting Pinus radiata site index from environmental variables. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 14, n. 1, p. 53-64, 1984.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Anuário Estatístico IBÁ 2016**. Brasília, 2016. 96 p.

ISAACS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **Applied geostatistics**: Introduction to applied geostatistics. Oxford: University Press, 1989. 516 p.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied multivariate statistical analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, 1988. 607 p.

KACHIGAN, S.K. **Multivariate statistical analysis**. New York: John Wiley e Sons, 1988.

KAISER, H.F. The application of electronic computers to factor analysis. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 141-151, 1960.

KANNEGIESSER, U. Apuntes sobre algunas acácias australianas: 1. *Acacia mearnsii* De Wild. **Ciência e Investigación Forestal**, v. 4, n. 2, p. 198-212, 1990.

KAYAHARA, G.; CARTER, R.E.; KLINKA, K. Site index of western hemlock (*Tsuga heterophylla*) in relation to soil nutrient and foliar chemical measures. **Forest Ecology and Management**, v. 74, n. 1/3, p. 161-169, 1998.

KRAKURAI, B.R.; ROBERT, P.C. HUGGINS, D.R. **Variability of corn/soybean yield and soil/landscape properties across a southwestern Minnesota Landscape**. In: International Conference On Precision Agriculture, 1998. St. Paul. Proceedings...Madison: American Society of Agronomy, 1998. 11p.

KRAMER, P.J.; KOSLOWSKI, T.T. **Physiology of woody plants**. New York: Academic Press. 1979. 454 p.

KRIGE, D.G. Two-dimensional weighted moving average trend surfaces for ore-evaluation. **Journal of the African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 66, p. 13-38, 1966.

LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Editora UNESP, 1998. 226 p.

LANDIM, P.M.B.; STURARO, J.R. **Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos**. Rio Claro: IGCE/UNESP, Laboratório Geomática, Texto Didático 06. 2002. 19 p. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>. Acesso em 21/09/2017.

LANDIM, P.M.B.; STURARO, J.R.; MONTEIRO, R.C. **Exemplos de aplicação da cokrigagem**. Rio Claro: IGCE/UNESP, Laboratório Geomática, Texto Didático 09, 17

p. 2002. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>. Acesso em 21/09/2017.

LARK, R.M. BOLAM, H.C.; MAYR, T. BRADLEY, R.I.; BURTON, R.G.O.; DAMPNEY, P.M.R. Analysis of yield maps in support of field investigation. In: STAFFORD, J, **Precision Agriculture '99**. Scheffield: Sheffield Academic Press, 1999. p. 151-162.

LATTIN, J.M.; CARROL, J.D.; GREEN, P.E. **Análise de dados multivariados**. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 455 p.

LAVORANTI, O.J. **Estabilidade e adaptabilidade fenotípica através da reamostragem "Bootstrap" no modelo AMMI**. 166 f. Tese (Doutorado em Estatística) – Departamento de Estatística, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2003.

LI, C.C. **Path analysis – a primer**. Boxwood: Pacific Grove, 1975. 346 p.

LIMA, J.S.S.; SOUZA, G.S.; SILVA, S.A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. **Revista Árvore**, v. 34, n. 1, p. 127-136, 2010.

LOPES, A.S.; CARVALHO, J.G. Micronutrientes: critérios de diagnose para solo e planta, correção de deficiências e excessos. In: BORKERT, C.M.; LANTMANN, A.F. (Eds.). **Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira**. Londrina: EMBRAPA – CNPSo/IAPAR/SBCSI, 1988. p. 133-178.

LOURENÇO, R.W.; LANDIM, P.M.B. Mapeamento de áreas de risco à saúde pública por meio de métodos geoestatísticos. **Caderno de Saúde Pública**, v. 21, n. 1, p. 150-160, 2005.

LOUW, J.H.; SCHOLLES, M.C. Site index functions using site descriptors for *Pinus patula* plantations in South Africa. **Forest Ecology and Management**, v. 225, p. 94-103, 2006.

MAESTRI, R.; GRAÇA, L.R.; SIMÕES, J.W.; FREITAS, A.J.P. Análise de adubação fosfatada na produção física e econômica da acácia-negra. **Boletim de Pesquisa Florestal**. Colombo, n. 14, p. 39-53. 1987.

MAESTRI, R. **Estimativa de produção presente e futura de volume de madeira e peso de casca para povoamentos de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild)**. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1992.

MAESTRI, R. **Modelos de crescimento e produção para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* considerando variáveis ambientais**. 143 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2003.

MACHADO, S.A. Complete enumeration forest inventory versus Cluster sampling methods applied in the Amazonian Rain Forest. **Revista Floresta**, v. 18, n. 1/2, p. 122-130, 1988.

MANZIONE, R.L. **Variabilidade especial de atributos químicos do solo em Araguari – MG**. Botucatu: UNESP, 2002. 155 p.

MARIANI, L.; CHANG, S.X.; KABZEMS, R. Effects of tree harvesting, forest floor removal, and compaction on soil microbial biomass, microbial respiration, and N availability in a boreal aspen forest in British Columbia. **Soil Biology Biochemistry**, v. 38, n. 1, p. 1734-1744, 2006.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Lancaster, v. 58, n. 8, p. 1246-1266, 1963.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**. Fontainebleu: École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1971. 211 p.

Mc BRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties? **Soil Science**, v. 135, n. 3, p. 177-183, 1983.

MELLO, J.M. DE. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 122 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, SP, 2004.

MELLO, N.O.; OLIVEIRA, T.S.; BATISTA, J.L.F.; RIBEIRO JÚNIOR, P.J.; KANEGAE JÚNIOR, H. Uso do estimador geoestatístico para predição volumétrica por talhão. **Revista Floresta**, c. 36, n. 2, p. 251-260, 2006.

MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 297 p.

MOCHIUTTI, S. **Produtividade e sustentabilidade de plantações de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) no Rio Grande do Sul**. 270 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2007.

MOÇO, M.K.S.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; CORREIA, M.E.F. Caracterização da fauna edáfica em diferentes coberturas vegetais na região norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 555-564, 2005.

MONTGOMERY, D.C.; PECK, E.A.; VINING, G.G. **Introduction to linear regression analysis**. New York: John Wiley, 2001.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961.

NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A.G. Towards sustained productivity of tropical plantations: science and practice. In: NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A.G (Ed.). **Management of soil nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR, 1997. p. 527-557.

NANNI, M.R.; DEMATTÊ, J.A.M.; FIORIO, P.R. Análise discriminante dos solos por meio da resposta spectral do nível terrestre. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 10, p. 995-1006, 2004.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.; ERH, K.T. Spatial variability of field measured soil-water properties. **Hilgardia**, v. 42, n. 7, p. 215-259, 1973.

NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Nutrição Mineral do eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (Ed.). **Relação solo-sucalipto**. Viçosa: Editora Folha de Viçosa, 1990. 330 p.

O'CONNELL, A.M.; SANKARAN, K.V. Organic matter accretion, decomposition and mineralisation. In: NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A.G. (Ed.). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR, 1997. p. 443-480.

OLEA, R.A. **Geostatistics for engineers and Earth scientists**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999. 303 p.

OLIVEIRA, H.A. **Acácia-negra e tanino no Rio Grande do Sul**. Canoas: La Salle. 1968.

OLIVEIRA, J.B. **Pedologia aplicada**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 414 p.

ORTEGA, A.; MONTEIRO, G. Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. Revision bibliográfica. **Ecologia**, v. 2, p. 155-184, 1988.

PEARSON, K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. **The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal Science**, v. 6, n. 2, p. 559-572, 1901.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M.M.; DIAS JÚNIOR, M.S.; GOMES, A.S.; TURATTI, A.L. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 113-126, 2005.

PELISSARI, A.L.; CALDEIRA, S.F.; SANTOS, V.S. dos; SANTOS, J.O.P. dos. Correlação espacial dos atributos químicos do solo com o desenvolvimento da teca em Mato Grosso. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 247-256, 2012.

PEREIRA, J.C.; MOURÃO, D.A.C.; SCALET, V.; SOUZA, C.A.M. DE. Comparação entre modelos de relação hipsométrica com e sem componente espacial para *Pinus* sp. Na FLONA Ipanema – SP. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 89, p. 43-52, 2011.

PEREIRA, B.W.F.; PITA, J.D.; MACIEL, M.N.M.; COSTA, M.S.S.; SOARES, J.A.C.; CORREA, D.L.; FIGUEIREDO, D.B. Geoestatística aplicada à variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e dendrométricos em plantio de *Tectona grandis* L.f. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Foz do Iguaçu, **Anais...Foz do Iguaçu: INPE**, 2013.

PETERSEN, G.W. Moisture characteristics of Pennsylvania soils: I Moisture retention as related to texture. **Soil Science Society of America Journal**, v. 32, n. 2, p. 272-275, 1967.

POGGIANI, F.; SCHUMACHER, M.V. Ciclagem de nutrientes em florestas nativas. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 287-308.

PREVEDELLO, B.M.S.; KRIEGER, K.I.; MOTTA, A.C.V. Considerações sobre interpretação de análise de solos. In: LIMA, M.R. (Ed.). **Diagnóstico e Recomendações de Manejo do Solo: Aspectos Teóricos e Metodológicos**. Curitiba: Brasil, 2006. c. 7, p. 125-142.

PRITCHETT, W.L. **Suelos forestales**: propiedades, conservación y mejoramiento. México: John Wiley & Sons, 1990.

QUEIROZ, D.M. Agricultura de precisão na produção de grãos. In: BORÉM, A. (Ed.). **Agricultura de Precisão**. Viçosa: Editora UFV, 2000. p. 1-42.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2006. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em 14 dez. 2017.

RACHWAL, M.F.G.; DEDECEK, R.A.; CURCIO, G.R.; SIMON, A.A. Manejo dos resíduos de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) e a sustentabilidade de sítio. **Ciência Florestal**, v. 17, p. 137-144, 2007.

RALSTON, C.W. Evaluation of forest site productivity. In: International Review of Forest Research, New York, 1964. **Proceedings**. New York: Academic PRESS, 1964, v. 1, p. 171-201.

RALSTON, C.W. Recognition and mapping of site types for afforestation. In: FAO World Symposium on Man-Made Forest and their Industrial Importance, Canberra, 1967. **Proceedings...** Canberra, 1967. v. 1, p. 172-187.

REGAZZI, A.J. **INF 766 – Análise multivariada**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Departamento de Informática, 2001. 166 p. (Apostila de disciplina).

RESENDE, M.; LANI, J.L.; REZENDE, S.B. Pedossistemas da mata atlântica: considerações pertinentes sobre a sustentabilidade. **Revista Árvore**, v. 26, n. 3, p. 261-269, 2002.

RIGATTO, P.A. **Influência dos atributos do solo sobre a produtividade e a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para a produção de celulose Kraft**. 120 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

RIBEIRO JÚNIOR, P.J. **Métodos geoestatísticos no estado da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. 99 f. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1995.

RIGATTO, P.A.; DEDECEK, R.A.; MATTOS, J.L.M de. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 701-709, 2005.

RIO GRANDE DO SUL. **Macrozoneamento agroecológico e econômico do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura e Abastecimento, 1994.

RODRIGUES, L.A.; CARVALHO, D.A.; FILHO, A.T.O.; CURI, N. Efeitos de solos e topografia sobre a distribuição de espécies arbóreas em um fragmento de floresta estacional semidecidual, em Luminárias, MG. **Revista Árvore**, v. 31, n. 1, p. 25-35, 2007.

RUFINO, T.M.C.; THIERSCH, C.R.; FERREIRA, S.O.; JUNIOR, H.K.; FAIS, D. Uso da geoestatística no estado da relação entre variáveis dendrométricas de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e atributos do solo. **Ambiência**, v. 2, n. 1, p. 83-93, 2006.

SAIDELLES, F.L.F. **Determinação da biomassa e altura de amostragem para a quantificação de nutrientes em *Acacia mearnsii* De Wild.** 97 f. Tese (Doutorado em Ciências Rurais) – Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2005.

SAIDELLES, F.L.F.; CALDEIRA, M.V.W.; SCHUMACHER, M.V.; BALBINOT, R. Determinação do ponto de amostragem para a quantificação de micronutrientes em acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Floresta**, v. 39, n. 1, p. 77-87, 2009.

SALAS, G. **Suelos y ecosistemas forestales**. San José: iica, 1987. 447 p.

SANQUETTA, C.R.; BEHLING, A.; CORTE, A.P.D.; RUZA, M.S.; SIMON, A.; SÃO JOSÉ, J.F.B. Relação hipsométrica em inventários pré-corte em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild. **Científica**, v. 42, n. 1, p. 80-90, 2014.

SANTI, A.L.; AMADO, T.J.C.; CHERUBIN, M.R.; MARTIN, T.N.; PIRES, J.L.; FLORA, L.P.D.; BASSO, C.J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1346-1357, 2012.

SANTOS, A.F.; AUER, C.G.; GRIGOLETTI JUNIOR, A.; SANTANA, D.L.Q. **O complexo gomose da acácia-negra**. Colombo: Embrapa Florestas, 2001. 8 p. Comunicado Técnico 44.

SCHNEIDER, P.R.; HOSOKAWA, R.T. Estudo de equações volumétricas para Quadros de volume com e sem casca para acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild). In: Congresso Florestal Brasileiro, 3. 1978, Manaus. **Anais...** Manaus: SBS, 1978. p. 90-95.

SCHNEIDER, P.R.; SILVA, J.A. Índice de sítio para acácia-negra, *Acacia mearnsii* De Wild. **Brasil Florestal**, n. 36, p. 58-82, 1980.

SCHNEIDER, P.R.; TONINI, H. Utilização de variáveis dummy em equações de volume para *Acacia mearnsii* De Wild. **Ciência Florestal**, v. 13, n. 2, p. 121-129, 2003.

SCHNEIDER, P.R.; FORTES, F.O.; SOUZA, L.H.S.; LÚCIO, A.D.; FINGER, C.A.G.; SCHNEIDER, P.R.P. Análise da mortalidade de *Acacia mearnsii* De Wild. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 2, p. 137-143, 2005.

SCHÖNAU, A.P.G.; ALDWORTH, W.J.K. Site evaluation in Black Wattle with special reference to soil factors. **South African Forestry Journal**, n. 156, p. 1-6, 1991.

SCHUSTER, I. **Correlações, coeficientes de trilha, composição de gluteminas e qualidade do trigo para panificação**. Viçosa: UFV, 1996. 98 p.

SCOLFORO, J.R.S. **Biometria Florestal: métodos para classificação de sítios florestais**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 1998. 393 p.

SEARLE, S.D. *Acacia mearnsii* De Wild. (Black Wattle) in Australia. In: BROWN, A.G.; KO, H.C. (Ed.). **Black Wattle and its Utilisation**. Barton: RIRDC, 1997. p. 1-12.

SEIGER, D.S. Economic potencial from Western Australian *Acacia* species: secondary plant products. **Conservation Science**, v. 4, n. 3, p. 109-116, 2002.

SELLE, G.L. **Influência de fatores ambientais na classificação de sítio para *Pinus taeda* L., na região de Cambará do Sul, RS.** 85 f. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, 1993.

SEMA. **Relatório final do inventário florestal contínuo do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, 2001. Disponível em <http://coralx.ufsm.br/ifcrs/index.php>. Acesso em 14 Mar. 2017.

SHERRY, S.P. The black wattle (*Acacia mearnsii*). Pietermaritzburg: University of Natal Press, 1971. 402 p.

SILVA JÚNIOR, R.L. DE. **Variabilidade espacial do índice de cone correlacionada com mapas de produtividade.** 132 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SIMON, A.A. A cadeira produtiva da acácia-negra, aspectos econômicos, sociais e ambientais. In: STROHSCHOEN, A.G.; REMPEL, C. **Reflorestamento e recuperação ambiental: Ambiente e tecnologia: o desenvolvimento sustentável em foco.** Lajeado: Univates, 2005. p. 149-166.

SNEATH, P.H.A. The application of computer to taxonomy. **Journal of General Microbiology**, v. 17, p. 201-226, 1957.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P.; VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 3, p. 1-10, 1997.

SPEARMAN, C. General intelligence objectively determined and measured. **American Journal of Psychology**, v. 15, n. 2, p. 201-293, 1904.

SPURR, S.H. **Forest Inventory.** New York: The Ronald Press Company, 1952.

STROTHMANN, R.O. Evaluating the growth potential of aspen-lands in Northern Minnesota. **Lake States Forest research paper**, v. 86, p. 1-20, 1960.

THOMPSON, S.K. **Sampling.** New York, Wiley-Interscience Publication, 1992. 343 p.

TINSLEY, H.E.A.; BROWN, S.D. Multivariate Statistics and Mathematical Modeling. In: TINSLEY, H.E.A.; BROWN, S.D. (Ed.). **Handbook of Applied Multivariate Statistics and Mathematical Modeling.** University Press, 2000. p. 3-36.

TOBAR, A. **Qualidade de sítio com referência especial a la altura mayor.** Esmeraldas, Equador: Universidade Técnica Luis Vargas Torres, 1976 (Revisión bibliográfica).

TOMÉ JÚNIOR, J.B. **Manual para interpretação de análise de solo.** Guaíba: Agropecuária, 1997.

TONINI, H.; FINGER, C.A.G.; SCHNEIDER, P.R.; SPATHELF, P. Crescimento em altura de *Pinus elliottii* Engelm., na Região de Piratini no Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Rural**, v. 31, n. 3, p. 417-423, 2001.

TORRES, D.A.; VALLE, J.I.; RESTREPO, G. Site index for teak in Colombia. **Journal of Forestry Research**, v. 23, v. 3, p. 405-411, 2012.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v. 38, p. 45-94, 1985.

VALLADARES, G.S.; GOMES, E.G.; MELLO, J.C.C.B.S.; PEREIRA, M.G.; DOS ANJOS, H.C.; EBELING, A.G.; BENITES, V.M. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, n. 1, p. 285-296, 2007.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, G.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v. 1, p. 1-54.

VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.; TOPP, G.C.; REYNOLDS, W.D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and meteorological parameters. In: ALVAREZ, V.H. (Ed.). **Tópicos em Ciência do solo II**. Viçosa- MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002, v. 2, p. 1-45.

VIOLA, M.R.; MELLO, C.R.; PINTO, D.B.F.; MELLO, J.M.; ÁVILA, L.F. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 9, p. 970-978, 2010.

WARD, J. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of American Statistical Association**, v. 58, n. 301, p. 236-244, 1963.

WRIGTH, S. Correlation and causation. **J. Agric Res**, v. 20, p. 557-585. 1921.

WRIGTH, S. The theory of path analysis – a replay to Niles' criticism. **Genetics**, v. 8, p. 239-255. 1923.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. **Advances in Soil Science**, v. 3, p. 15-23, 1951.

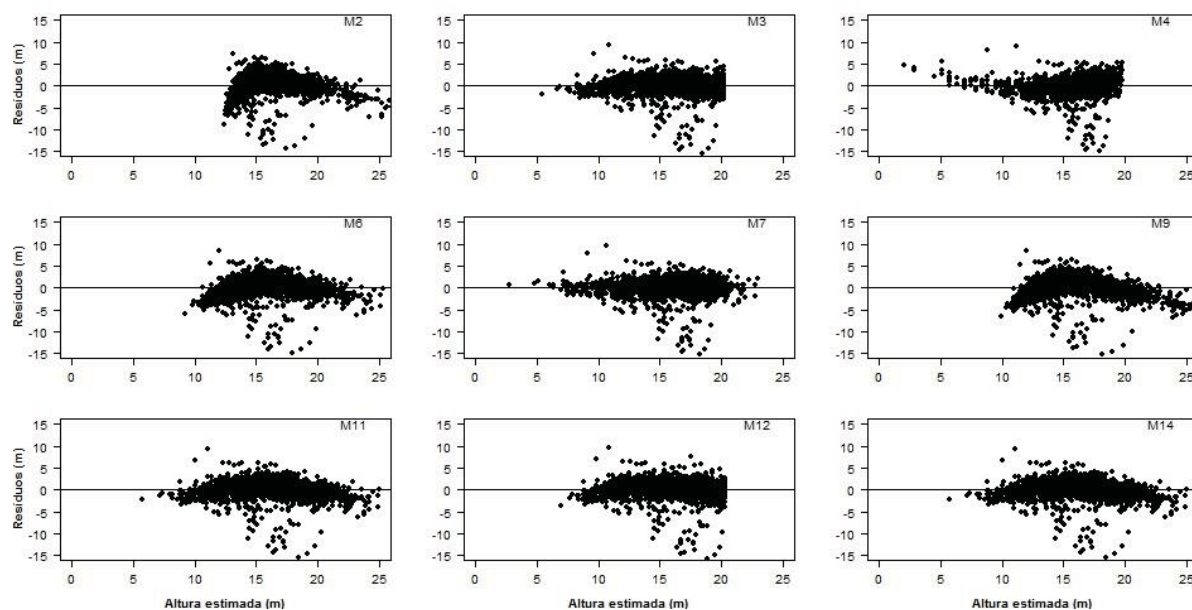
YAMAMOTO, J.K. LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1. Ed. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2013. 215 p.

ZAHNER, R. Site- Quality relationship of pine forest in Southern Arkansas and Northern Louisiana. **Forest Science**, v. 4, n. 2, p. 163-176, 1958.

ZOBEL, B.J.; WYK, G. VAN; STAHL, P. **Growing exotic forest**. New York: John Wiley & Sons. Inc., 1987. 508 p.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS OBTIDOS A PARTIR DE 9 EQUAÇÕES MATEMÁTICAS DE PIOR DESEMPENHO EMPREGADAS PARA DESCREVER A RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA



APÊNDICE 2 – VALORES MÉDIOS DE DAP, HT E VALORES DE HDOM, IS_7, V E G POR PARCELA EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA-NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL

Parcela	DAP	HT	HDOM	IS_7	V	G	Parcela	DAP	HT	HDOM	IS_7	V	G
1	13,86	16,61	20,75	20,46	182,65	19,60	53	10,53	14,42	17,47	17,24	139,41	16,69
2	12,07	15,48	20,15	19,87	226,86	24,90	54	10,97	14,66	18,13	17,89	159,88	18,61
3	13,02	16,62	21,43	21,13	239,45	25,18	55	12,40	16,09	20,13	19,87	201,44	21,54
4	12,55	16,02	20,58	20,29	207,01	22,21	56	11,54	15,40	19,26	19,00	195,50	22,24
5	12,46	16,61	21,17	20,88	232,08	24,32	57	10,93	14,31	19,08	18,83	147,29	17,32
6	11,35	15,41	18,94	18,67	183,95	20,54	58	10,56	14,58	18,91	18,66	165,04	19,44
7	12,20	15,95	19,44	19,17	205,01	22,33	59	12,30	15,90	19,96	19,70	189,30	20,65
8	11,48	15,22	19,23	18,96	184,89	21,24	60	13,01	16,31	21,08	20,81	200,90	21,06
9	13,27	16,40	20,48	20,19	237,14	25,91	61	14,32	17,07	20,84	20,57	208,35	21,70
10	12,01	15,67	17,50	17,26	178,97	20,17	62	12,20	16,15	20,14	19,88	228,10	24,61
11	12,12	15,48	19,85	19,57	206,56	23,10	63	10,03	14,46	18,48	18,23	155,35	18,07
12	11,20	14,72	17,12	16,88	181,26	21,28	64	11,32	15,06	19,49	19,24	208,53	22,87
13	12,38	15,63	18,76	18,50	194,08	21,57	65	10,89	15,61	19,13	18,88	183,67	20,62
14	11,21	14,91	19,27	19,00	174,13	19,76	66	11,92	15,91	19,60	19,34	206,49	22,49
15	11,62	15,10	17,78	17,53	177,42	20,20	67	10,90	15,19	19,08	18,83	148,11	16,98
16	13,28	16,29	20,61	20,32	232,37	25,43	68	11,73	15,88	19,40	19,15	172,20	19,01
17	11,11	15,11	19,28	19,01	172,29	19,28	69	12,14	15,92	18,64	18,40	204,10	22,25
18	12,30	15,68	19,53	19,26	210,29	23,43	70	13,37	16,86	20,68	20,41	185,54	19,25
19	10,89	14,73	18,46	18,22	148,24	16,82	71	13,10	16,76	20,52	20,25	194,24	20,62
20	11,84	16,07	19,79	19,53	210,73	22,67	72	11,39	15,26	17,57	17,34	188,75	21,79
21	12,95	15,69	19,55	19,29	183,52	20,22	73	12,88	16,41	20,11	19,85	206,17	22,27
22	12,30	14,92	19,12	18,87	165,27	18,35	74	12,14	16,09	20,43	20,20	183,51	19,64
23	12,27	16,23	21,07	20,79	211,30	22,50	76	12,93	16,68	19,36	19,09	180,51	19,47
24	11,06	15,11	19,17	18,92	169,97	18,91	77	15,32	17,95	22,39	22,08	255,24	25,36
25	9,94	13,90	17,26	17,04	135,99	16,24	78	11,11	14,77	18,40	18,14	145,20	16,64
26	11,74	15,23	19,44	19,19	199,11	22,71	79	13,22	16,45	22,13	21,82	241,03	25,51
27	11,65	15,58	18,34	18,10	175,07	19,65	80	13,37	17,12	22,00	21,69	278,65	28,48
28	12,72	16,39	20,28	20,02	221,21	23,91	81	12,64	16,01	20,92	20,63	206,52	21,96
29	12,53	16,22	20,22	19,95	188,48	20,19	82	14,04	17,49	22,52	22,21	264,07	26,60
32	14,09	16,51	20,98	20,69	260,83	28,06	83	12,89	16,65	20,04	19,77	219,89	23,48
33	12,71	15,66	19,95	19,67	162,47	17,70	84	11,49	15,34	19,06	18,81	193,69	21,97
38	13,20	17,09	21,47	21,17	230,94	23,96	85	12,33	16,11	18,32	18,08	209,10	22,94
39	12,37	15,99	20,09	19,81	196,09	21,45	86	12,78	16,26	20,26	19,99	218,05	23,62
40	10,68	14,91	18,01	17,75	155,17	17,88	87	11,93	15,95	18,76	18,52	204,94	22,97
41	11,98	15,53	20,40	20,11	219,51	23,65	88	11,97	15,12	18,30	18,05	143,59	16,48
42	11,31	14,69	18,73	18,47	174,79	19,78	89	11,11	15,16	19,66	19,40	173,69	19,37
43	13,92	16,77	20,31	20,03	223,95	23,90	90	12,12	15,77	19,80	19,54	218,04	24,37
44	12,82	16,06	20,71	20,42	209,09	22,77	91	12,07	15,68	17,66	17,43	192,69	19,78
45	11,04	14,82	18,42	18,16	170,40	19,55	92	13,49	16,52	19,77	19,51	177,74	19,20
46	13,05	15,04	19,87	19,59	185,86	20,95	93	11,42	15,68	19,40	19,15	180,09	19,85
47	13,21	16,57	19,97	19,69	254,01	27,10	94	11,84	15,79	18,38	18,13	184,37	20,27
48	11,43	15,40	20,05	19,77	183,71	20,77	95	10,96	15,02	18,00	17,76	159,21	18,47
49	11,96	15,91	20,20	19,92	180,97	19,78	96	12,90	16,34	19,84	19,58	241,39	26,13
50	11,11	15,44	19,61	19,33	168,52	18,60	97	10,53	14,80	19,12	18,87	186,50	21,23
51	13,60	16,71	20,63	20,34	225,72	24,01	98	10,73	14,58	17,58	17,35	162,85	19,47
52	14,36	16,83	22,13	21,82	266,97	27,90							

APÊNDICE 3 – ALTITUDE (M) E PROFUNDIDADE DO SOLO (CM) DAS PARCELAS AMOSTRADAS EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL.

Parcela	Talhão	IS_7	Altitude	ProfSol	Parcela	Talhão	IS_7	Altitude	ProfSol
			m	cm				m	cm
1	T-01	20,46	61,33	60,00	53	T-14	17,24	90,16	60,00
2	T-02	19,87	46,75	60,00	54	T-14	17,89	112,46	60,00
3	T-02	21,13	54,02	60,00	55	T-16	19,87	86,45	60,00
4	T-03	20,29	53,97	60,00	56	T-18	19,00	37,51	60,00
5	T-03	20,88	41,82	60,00	57	T-18	18,83	92,35	60,00
6	T-03	18,67	47,86	60,00	58	T-18	18,66	102,97	60,00
7	T-04	19,17	67,42	60,00	59	T-19	19,70	76,78	60,00
8	T-04	18,96	61,39	60,00	60	T-19	20,81	89,01	60,00
9	T-04	20,19	61,60	40,00	61	T-19	20,57	86,35	60,00
10	T-04	17,26	58,50	60,00	62	T-20	19,88	82,74	60,00
11	T-04	19,57	68,50	60,00	63	T-20	18,23	92,27	60,00
12	T-09	16,88	70,17	60,00	64	T-20	19,24	106,98	60,00
13	T-10	18,50	58,68	60,00	65	T-21	18,88	99,61	60,00
14	T-10	19,00	58,38	60,00	66	T-21	19,34	99,04	40,00
15	T-10	17,53	71,84	60,00	67	T-21	18,83	94,41	60,00
16	T-10	20,32	74,97	60,00	68	T-22	19,15	102,04	40,00
17	T-12	19,01	69,56	60,00	69	T-22	18,40	93,87	60,00
18	T-12	19,26	70,40	60,00	70	T-22	20,41	75,12	60,00
19	T-19	18,22	81,96	60,00	71	T-23	20,25	90,46	60,00
20	T-19	19,53	71,05	60,00	72	T-23	17,34	79,59	60,00
21	T-19	19,29	69,40	60,00	73	T-23	19,85	81,37	60,00
22	T-19	18,87	69,88	60,00	74	T-07	20,20	110,92	60,00
23	T-20	20,79	70,18	60,00	76	T-08	19,09	113,05	60,00
24	T-22	18,92	71,00	60,00	77	T-11	22,08	127,87	60,00
25	T-22	17,04	60,70	60,00	78	T-11	18,14	129,04	60,00
26	T-22	19,19	70,35	60,00	79	T-12	21,82	116,35	60,00
27	T-22	18,10	57,89	60,00	80	T-13	21,69	118,18	60,00
28	T-23	20,02	57,44	60,00	81	T-13	20,63	128,19	60,00
29	T-23	19,95	66,47	60,00	82	T-13	22,21	126,37	60,00
32	T-02	20,69	80,10	60,00	83	T-14	19,77	125,71	60,00
33	T-07	19,67	94,02	40,00	84	T-14	18,81	112,21	60,00
38	T-08	21,17	103,55	60,00	85	T-16	18,08	127,13	60,00
39	T-09	19,81	93,90	60,00	86	T-16	19,99	133,54	40,00
40	T-09	17,75	94,15	40,00	87	T-17	18,52	163,12	60,00
41	T-09	20,11	85,45	60,00	88	T-17	18,05	94,16	40,00
42	T-09	18,47	86,96	60,00	89	T-17	19,40	117,08	60,00
43	T-10	20,03	80,25	60,00	90	T-18	19,54	115,29	60,00
44	T-11	20,42	99,04	40,00	91	T-18	17,43	116,86	40,00
45	T-11	18,16	92,63	60,00	92	T-20	19,51	127,33	40,00
46	T-11	19,59	106,22	60,00	93	T-20	19,15	123,33	60,00
47	T-12	19,69	90,29	60,00	94	T-21	18,13	116,31	60,00
48	T-12	19,77	95,17	60,00	95	T-21	17,76	129,68	40,00
49	T-12	19,92	81,02	60,00	96	T-21	19,58	126,96	60,00
50	T-13	19,33	84,88	60,00	97	T-21	18,87	123,90	60,00
51	T-13	20,34	90,43	60,00	98	T-21	17,35	142,48	60,00
52	T-13	21,82	97,49	60,00					

Em que: ProfSol = profundidade efetiva do solo.

APÊNDICE 4 – GRANULOMETRIA DO SOLO (% m.m⁻¹) E PRODUTIVIDADE (IS_7) DAS PARCELAS AMOSTRADAS EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL.

Parcela	Talhão	IS_7	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila
			% m.m ⁻¹								
			0 a 20 cm			20 a 40 cm			0 a 40 cm		
Profundidade											
1	T-01	20,46	76,02	13,96	10,02	77,70	12,30	10,00	71,58	15,40	13,02
2	T-02	19,87	79,05	11,64	9,31	75,09	15,61	9,30	77,07	13,63	9,31
3	T-02	21,13	75,66	15,22	9,12	75,41	15,47	9,12	75,54	15,35	9,12
4	T-03	20,29	78,41	13,15	8,44	80,33	13,76	5,91	79,37	13,46	7,18
5	T-03	20,88	72,25	17,03	10,72	69,57	19,69	10,74	70,91	18,36	10,73
6	T-03	18,67	78,04	13,52	8,44	75,53	16,04	8,43	76,79	14,78	8,44
7	T-04	19,17	73,20	18,59	8,21	64,28	25,00	10,72	68,74	21,80	9,47
8	T-04	18,96	72,20	16,87	10,93	69,84	19,23	10,93	71,02	18,05	10,93
9	T-04	20,19	74,19	11,68	14,13	74,73	11,14	14,13	74,46	11,41	14,13
10	T-04	17,26	65,14	20,74	14,12	65,19	20,68	14,13	65,17	20,71	14,13
11	T-04	19,57	70,24	19,75	10,01	72,26	15,23	12,51	71,25	17,49	11,26
12	T-09	16,88	77,13	17,16	5,71	75,75	18,54	5,71	76,44	17,85	5,71
13	T-10	18,50	75,81	15,06	9,13	72,45	15,93	11,62	74,13	15,50	10,38
14	T-10	19,00	59,33	24,03	16,64	78,48	14,92	6,60	68,91	19,48	11,62
15	T-10	17,53	74,31	13,15	12,54	72,62	14,84	12,54	73,47	14,00	12,54
16	T-10	20,32	71,65	17,64	10,71	72,93	16,34	10,73	72,29	16,99	10,72
17	T-12	19,01	77,53	16,87	5,70	78,30	13,50	8,20	77,92	15,19	6,95
18	T-12	19,26	74,44	17,13	8,43	71,03	20,62	8,35	72,74	18,88	8,39
19	T-19	18,22	77,92	12,74	9,34	75,15	12,98	11,87	76,54	12,86	10,61
20	T-19	19,53	76,60	8,36	15,04	73,92	8,54	17,54	75,26	8,45	16,29
21	T-19	19,29	73,17	15,20	11,63	72,88	14,59	12,53	73,03	14,90	12,08
22	T-19	18,87	78,55	10,53	10,92	74,57	14,52	10,91	76,56	12,53	10,92
23	T-20	20,79	75,64	14,34	10,02	70,13	17,35	12,52	72,89	15,85	11,27
24	T-22	18,92	74,64	17,85	7,51	73,09	14,40	12,51	73,87	16,13	10,01
25	T-22	17,04	75,79	15,78	8,43	75,96	15,61	8,43	75,88	15,70	8,43
26	T-22	19,19	72,68	12,97	14,35	74,37	11,28	14,35	73,53	12,13	14,35
27	T-22	18,10	71,38	16,10	12,52	66,93	20,57	12,50	69,16	18,34	12,51
28	T-23	20,02	75,89	14,80	9,31	73,97	14,20	11,83	74,93	14,50	10,57
29	T-23	19,95	76,54	12,91	10,55	75,52	12,65	11,83	76,03	12,78	11,19
32	T-02	20,69	72,75	7,21	20,04	71,99	2,92	25,09	72,37	5,07	22,57
33	T-07	19,67	72,90	13,00	14,10	69,45	16,45	14,10	71,18	14,73	14,10
38	T-08	21,17	73,88	13,56	12,56	72,57	12,36	15,07	73,23	12,96	13,82
39	T-09	19,81	74,12	10,81	15,07	73,33	11,60	15,07	73,73	11,21	15,07
40	T-09	17,75	63,85	16,02	20,13	57,98	9,28	32,74	60,92	12,65	26,44
41	T-09	20,11	74,57	15,40	10,03	75,56	14,42	10,02	75,07	14,91	10,03
42	T-09	18,47	78,58	13,00	8,42	74,95	16,63	8,42	76,77	14,82	8,42
43	T-10	20,03	71,45	17,82	10,73	71,38	17,90	10,72	71,42	17,86	10,73
44	T-11	20,42	71,58	15,22	13,20	69,34	17,45	13,21	70,46	16,34	13,21
45	T-11	18,16	70,78	17,62	11,60	68,18	17,72	14,10	69,48	17,67	12,85
46	T-11	19,59	73,43	15,85	10,72	70,17	19,10	10,73	71,80	17,48	10,73
47	T-12	19,69	75,19	16,60	8,21	72,15	19,65	8,20	73,67	18,13	8,21
48	T-12	19,77	77,77	13,11	9,12	70,49	17,89	11,62	74,13	15,50	10,37
49	T-12	19,92	75,17	14,11	10,72	73,97	15,32	10,71	74,57	14,72	10,72
50	T-13	19,33	64,27	17,49	18,24	59,46	19,80	20,74	61,87	18,65	19,49
51	T-13	20,34	72,07	16,32	11,61	69,54	11,34	19,12	70,81	13,83	15,37
52	T-13	21,82	71,11	17,28	11,61	67,34	13,54	19,12	69,23	15,41	15,37
53	T-14	17,24	71,11	15,42	13,47	64,57	16,93	18,50	67,84	16,18	15,99

Continua...

APÊNDICE 4 – GRANULOMETRIA DO SOLO (% m.m⁻¹) E PRODUTIVIDADE (IS_7) DAS PARCELAS AMOSTRADAS EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL.

Parcela	Talhão	IS_7	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila
			% m.m ⁻¹								
			0 a 20 cm			20 a 40 cm			0 a 40 cm		
	Profundidade										
54	T-14	17,89	72,24	13,61	14,15	71,88	13,98	14,14	72,06	13,80	14,15
55	T-16	19,87	68,35	9,69	21,93	67,24	10,84	21,92	67,80	10,27	21,93
56	T-18	19,00	66,97	14,93	18,11	66,49	14,17	19,34	66,73	14,55	18,73
57	T-18	18,83	68,01	14,38	17,31	63,92	17,26	18,82	65,97	15,82	18,07
58	T-18	18,66	70,98	14,89	14,13	64,18	19,22	16,60	67,58	17,06	15,37
59	T-19	19,70	76,52	12,87	10,71	75,17	14,11	10,72	75,85	13,49	10,72
60	T-19	20,81	70,57	16,65	13,78	69,29	13,17	17,54	69,93	14,91	15,66
61	T-19	20,57	72,05	14,54	13,41	74,33	12,24	13,43	73,19	13,39	13,42
62	T-20	19,88	70,30	13,77	15,93	69,32	14,74	15,94	69,81	14,26	15,94
63	T-20	18,23	71,14	16,35	12,51	68,08	16,89	15,03	69,61	16,62	13,77
64	T-20	19,24	72,87	11,22	15,91	71,30	12,80	15,90	72,09	12,01	15,91
65	T-21	18,88	72,38	16,88	10,74	71,62	17,67	10,71	72,00	17,28	10,73
66	T-21	19,34	68,20	16,77	15,03	56,29	13,62	30,09	62,25	15,20	22,56
67	T-21	18,83	72,31	14,28	13,41	66,27	15,28	18,45	69,29	14,78	15,93
68	T-22	19,15	70,27	19,72	10,01	68,64	16,35	15,01	69,46	18,04	12,51
69	T-22	18,40	74,75	15,25	10,00	69,60	17,90	12,50	72,18	16,58	11,25
70	T-22	20,41	78,98	13,52	7,50	77,28	15,22	7,50	78,13	14,37	7,50
71	T-23	20,25	72,22	11,84	15,94	68,84	15,20	15,96	70,53	13,52	15,95
72	T-23	17,34	72,90	11,18	15,92	72,44	14,15	13,41	72,67	12,67	14,67
73	T-23	19,85	71,40	15,55	13,05	71,62	14,02	14,36	71,51	14,79	13,71
74	T-07	20,20	70,20	18,20	11,60	67,32	18,57	14,11	68,76	18,39	12,86
76	T-08	19,09	73,48	14,91	11,61	69,67	13,71	16,62	71,58	14,31	14,12
77	T-11	22,08	70,41	16,15	13,44	64,58	19,46	15,96	67,50	17,81	14,70
78	T-11	18,14	74,73	13,66	11,61	71,64	14,19	14,17	73,19	13,93	12,89
79	T-12	21,82	78,68	12,18	9,14	70,32	15,56	14,12	74,50	13,87	11,63
80	T-13	21,69	74,53	17,27	8,20	75,08	14,21	10,71	74,81	15,74	9,46
81	T-13	20,63	74,03	14,37	11,60	68,03	17,84	14,13	71,03	16,11	12,87
82	T-13	22,21	70,89	15,65	13,46	69,95	14,07	15,98	70,42	14,86	14,72
83	T-14	19,77	72,89	13,66	13,45	73,34	13,22	13,44	73,12	13,44	13,45
84	T-14	18,81	77,06	17,23	5,71	60,01	24,26	15,73	68,54	20,75	10,72
85	T-16	18,08	73,55	18,22	8,23	72,54	16,74	10,72	73,05	17,48	9,48
86	T-16	19,99	66,05	17,30	16,65	64,38	18,97	16,65	65,22	18,14	16,65
87	T-17	18,52	77,43	11,64	10,93	74,10	12,48	13,42	75,77	12,06	12,18
88	T-17	18,05	68,09	17,79	14,12	65,49	15,32	19,19	66,79	16,56	16,66
89	T-17	19,40	70,74	16,03	13,23	67,18	18,69	14,13	68,96	17,36	13,68
90	T-18	19,54	72,36	13,40	14,24	72,16	11,90	15,94	72,26	12,65	15,09
91	T-18	17,43	72,53	14,25	13,22	67,26	14,47	18,27	69,90	14,36	15,75
92	T-20	19,51	67,41	13,24	19,35	64,40	13,74	21,86	65,91	13,49	20,61
93	T-20	19,15	71,50	17,57	10,93	71,02	18,05	10,93	71,26	17,81	10,93
94	T-21	18,13	68,26	20,25	11,49	65,79	20,24	13,97	67,03	20,25	12,73
95	T-21	17,76	72,30	16,09	11,61	70,47	17,92	11,61	71,39	17,01	11,61
96	T-21	19,58	69,00	18,50	12,50	68,09	16,90	15,01	68,55	17,70	13,76
97	T-21	18,87	67,61	16,66	15,73	66,13	18,14	15,73	66,87	17,40	15,73
98	T-21	17,35	70,75	17,98	11,27	68,91	18,57	12,52	69,83	18,28	11,90

APÊNDICE 5 – RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO E PRODUTIVIDADE (IS_7) DAS PARCELAS AMOSTRADAS EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁÇA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL.

Parcela	Talhão	IS_7	pH (água)	SMP	P	K ⁺	Na ⁺	MO	Argila	Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Mn ⁺²	Zn ⁺²	Cu ⁺²
			ad			mg, dm ⁻³		% m, m ⁻¹	%		cmol _c , dm ⁻³			mg, dm ⁻³	
1	T-01	20,46	4,0	5,6	3	27	6	1,2	14	1,9	1,2	0,4	33	0,3	0,6
2	T-02	19,87	4,1	6,0	3	31	4	1,5	12	1,1	1,2	0,3	64	0,3	0,6
3	T-02	21,13	4,0	5,9	3	39	4	1,1	14	1,4	0,3	0,1	71	0,3	0,2
4	T-03	20,29	4,1	5,6	6	43	5	1,8	10	2,2	0,3	0,1	50	0,7	0,1
5	T-03	20,88	4,1	5,8	3	59	4	1,9	16	1,6	0,5	0,2	98	0,4	0,6
6	T-03	18,67	4,4	5,9	6	43	5	1,8	14	1,4	0,4	0,1	24	0,6	0,2
7	T-04	19,17	4,0	5,8	4	47	3	1,8	15	1,6	0,3	0,1	66	0,4	0,2
8	T-04	18,96	4,2	5,8	3	51	5	1,5	15	1,6	0,3	0,1	105	0,4	0,4
9	T-04	20,19	4,0	5,5	4	55	4	1,9	19	2,2	0,3	0,1	114	0,6	0,8
10	T-04	17,26	4,1	5,9	3	39	4	1,5	14	1,2	1,2	0,3	73	0,4	0,6
11	T-04	19,57	4,1	6,0	3	43	3	1,7	15	1,2	1,2	0,3	78	0,4	0,9
12	T-09	16,88	4,2	6,0	7	31	6	2,4	10	1,2	0,2	0,1	31	0,5	0,1
13	T-10	18,50	4,2	5,8	4	39	5	2,2	13	1,4	0,3	0,1	171	0,5	0,6
14	T-10	19,00	4,6	6,1	4	39	5	1,5	13	0,9	0,2	0,1	78	0,6	0,2
15	T-10	17,53	4,3	5,9	3	51	4	1,2	14	1,3	0,2	0,1	56	0,4	0,2
16	T-10	20,32	4,4	5,9	3	51	5	1,2	14	1,0	0,4	0,1	78	0,4	0,4
17	T-12	19,01	4,3	6,1	3	31	4	1,4	10	1,0	0,2	0,1	64	0,3	0,1
18	T-12	19,26	4,2	5,9	3	47	6	1,5	12	1,6	0,2	0,1	50	0,4	0,2
19	T-19	18,22	4,8	6,0	3	39	6	1,7	15	1,4	1,2	0,3	127	0,3	0,6
20	T-19	19,53	4,2	6,2	4	35	4	1,7	13	1,2	1,3	0,3	87	0,3	0,6
21	T-19	19,29	4,2	5,9	3	35	12	1,4	16	1,7	1,2	0,3	69	0,3	0,6
22	T-19	18,87	4,1	5,9	4	39	5	1,4	12	1,5	1,1	0,3	58	0,4	0,2
23	T-20	20,79	4,1	6,1	4	39	5	1,0	13	1,3	1,2	0,5	42	0,3	0,6
24	T-22	18,92	4,1	6,0	2	55	4	1,2	12	1,3	0,3	0,1	32	0,4	0,6
25	T-22	17,04	4,3	5,8	3	31	5	1,4	10	1,4	0,2	0,1	37	0,3	0,2
26	T-22	19,19	4,1	5,7	6	94	12	1,4	15	1,3	0,3	0,1	52	0,5	0,8
27	T-22	18,10	4,1	5,8	2	51	3	1,1	16	1,3	0,3	0,1	87	0,4	0,9
28	T-23	20,02	4,1	5,6	4	39	5	1,4	10	1,6	0,4	0,1	44	0,5	0,6
29	T-23	19,95	4,1	5,9	5	35	5	1,1	10	1,4	0,5	0,1	49	0,4	0,4
32	T-02	20,69	3,8	5,4	3	63	5	1,2	17	2,0	1,1	0,4	24	0,4	0,6
33	T-07	19,67	4,2	5,7	3	82	3	1,5	16	1,6	0,3	0,1	32	0,4	0,1
38	T-08	21,17	4,2	5,8	3	35	4	1,5	15	1,5	0,3	0,1	71	0,5	0,2
39	T-09	19,81	4,0	5,9	4	35	4	2,1	15	2,0	0,4	0,1	76	0,4	0,4
40	T-09	17,75	4,0	5,2	3	66	4	1,9	22	2,6	0,3	0,1	18	0,4	0,2
41	T-09	20,11	4,3	5,9	1	63	4	1,2	10	1,0	0,3	0,1	29	0,6	0,2
42	T-09	18,47	4,3	5,7	1	31	5	1,2	13	1,4	0,4	0,1	29	0,4	0,4
43	T-10	20,03	4,2	5,8	1	63	4	1,1	16	1,5	0,2	0,1	73	0,3	0,4
44	T-11	20,42	4,3	5,9	3	55	8	1,5	15	1,3	0,3	0,1	71	0,4	0,4
45	T-11	18,16	4,4	6,0	3	55	4	1,1	15	1,0	0,2	0,1	146	0,5	0,7
46	T-11	19,59	4,2	5,6	3	35	4	1,4	15	1,7	0,6	0,2	20	0,5	0,2
47	T-12	19,69	4,4	5,9	4	27	6	2,1	10	1,1	0,6	0,2	91	0,6	0,2
48	T-12	19,77	4,5	5,9	1	70	5	1,0	15	1,5	0,1	0,1	93	0,3	0,1
49	T-12	19,92	4,1	5,5	4	43	6	1,8	15	2,6	0,6	0,2	21	0,6	0,2
50	T-13	19,33	4,2	5,7	3	59	4	1,7	24	1,4	0,3	0,1	91	0,5	0,6
51	T-13	20,34	4,1	5,6	3	55	4	1,1	16	1,9	0,3	0,1	53	0,3	0,2
52	T-13	21,82	4,1	5,6	3	59	4	1,4	14	1,4	0,4	0,1	54	0,4	0,4
53	T-14	17,24	4,4	5,6	3	39	9	1,8	17	1,9	0,5	0,1	61	0,7	0,4

Continua...

APÊNDICE 5 – RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO E PRODUTIVIDADE (IS_7) DAS PARCELAS AMOSTRADAS EM PLANTIOS COMERCIAIS DE *ACACIA MEARNsii* DE WILD, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL.

Parcela	Talhão	IS_7	pH (água)	SMP	P	K ⁺	Na ⁺	MO	Argila	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺	Cu ²⁺
			ad	mg, dm ⁻³			% m, m ⁻¹	%	cmol _c , dm ⁻³			mg, dm ⁻³			
54	T-14	17,89	4,2	5,7	1	35	4	1,4	16	1,6	0,2	0,1	78	0,3	0,2
55	T-16	19,87	4,2	5,7	4	39	6	1,2	16	1,9	0,3	0,1	53	0,4	0,2
56	T-18	19,00	4,2	5,7	1	66	5	1,9	17	1,8	1,4	0,4	75	0,5	1,1
57	T-18	18,83	4,1	5,7	1	70	3	1,5	19	1,8	1,2	0,3	73	0,4	0,9
58	T-18	18,66	4,3	5,8	3	66	4	1,7	16	1,3	0,4	0,1	99	0,5	0,6
59	T-19	19,70	4,3	6,1	4	39	5	1,1	15	1,3	1,0	0,3	78	0,4	0,4
60	T-19	20,81	4,0	5,6	3	59	4	1,8	17	1,7	1,2	0,3	40	0,3	0,4
61	T-19	20,57	4,2	5,9	3	39	3	1,1	16	1,4	1,2	0,2	80	0,3	0,9
62	T-20	19,88	4,0	5,7	1	51	8	1,4	17	1,6	1,2	0,4	76	0,3	0,8
63	T-20	18,23	4,2	5,9	3	55	6	1,1	16	1,4	1,1	0,4	87	0,3	0,9
64	T-20	19,24	4,0	5,4	1	63	6	1,4	18	1,6	1,1	0,4	44	0,3	0,6
65	T-21	18,88	4,3	6,1	3	43	6	1,2	16	1,0	1,1	0,4	171	0,3	0,8
66	T-21	19,34	4,1	5,4	1	94	5	1,7	20	2,0	1,2	0,5	40	0,5	0,9
67	T-21	18,83	4,2	5,7	5	51	5	1,7	16	1,6	0,5	0,1	57	0,4	0,6
68	T-22	19,15	4,1	5,8	2	39	4	1,0	15	1,3	0,4	0,1	104	0,4	0,9
69	T-22	18,40	4,1	5,8	4	51	4	1,4	15	1,3	0,4	0,1	71	0,4	0,8
70	T-22	20,41	4,2	6,1	1	47	4	1,0	13	1,0	1,1	0,4	66	0,3	0,8
71	T-23	20,25	4,3	6,0	2	55	4	1,1	15	1,2	0,4	0,1	118	0,4	1,2
72	T-23	17,34	4,1	5,6	4	63	5	1,2	19	1,6	0,3	0,1	41	0,4	0,4
73	T-23	19,85	4,1	5,9	5	51	7	1,1	15	1,3	0,5	0,1	107	0,5	0,9
74	T-07	20,20	4,1	5,7	3	55	3	1,5	15	1,8	0,3	0,1	71	0,4	0,6
76	T-08	19,09	4,0	5,6	1	51	2	1,5	23	1,8	0,3	0,1	49	0,4	0,4
77	T-11	22,08	4,2	5,9	4	55	5	1,5	14	1,3	0,3	0,1	71	0,4	0,2
78	T-11	18,14	4,5	6,0	3	43	4	1,1	16	1,3	0,2	0,1	120	0,4	0,6
79	T-12	21,82	4,5	5,8	3	43	6	1,4	15	1,5	0,9	0,3	66	0,8	0,1
80	T-13	21,69	4,2	5,8	1	47	9	1,2	13	1,5	0,3	0,1	66	0,4	0,2
81	T-13	20,63	4,3	5,7	3	47	7	1,8	15	1,9	0,5	0,2	51	0,7	0,2
82	T-13	22,21	4,0	5,5	4	55	5	1,4	18	1,8	0,3	0,1	85	0,5	0,4
83	T-14	19,77	4,1	5,6	3	43	4	1,4	16	1,3	0,1	0,1	41	0,4	0,1
84	T-14	18,81	4,2	5,6	4	43	12	1,9	18	2,1	0,5	0,2	95	0,6	0,4
85	T-16	18,08	4,1	5,5	3	66	8	1,7	15	1,9	0,8	0,2	79	0,8	0,2
86	T-16	19,99	3,9	5,3	3	63	5	2,4	17	3,0	0,4	0,1	59	0,5	0,4
87	T-17	18,52	4,1	5,9	4	55	4	1,4	12	1,4	1,1	0,4	82	0,4	0,4
88	T-17	18,05	4,3	5,7	4	55	7	2,4	17	1,3	1,9	0,7	122	0,5	0,4
89	T-17	19,40	4,0	5,6	3	35	4	1,7	16	1,7	0,3	0,1	91	0,6	0,4
90	T-18	19,54	3,9	5,5	1	74	5	1,5	15	1,8	1,2	0,3	42	0,5	0,9
91	T-18	17,43	4,1	5,6	4	55	4	2,2	20	1,9	0,4	0,1	41	0,4	0,1
92	T-20	19,51	4,2	5,5	1	90	4	1,9	20	1,9	1,4	0,4	82	0,8	0,9
93	T-20	19,15	4,1	5,8	3	51	4	1,9	15	1,6	0,3	0,1	76	0,5	0,2
94	T-21	18,13	4,3	5,9	2	51	4	1,2	16	1,2	0,3	0,1	132	0,4	1,3
95	T-21	17,76	4,0	5,3	7	63	4	1,5	21	2,2	0,5	0,1	43	0,4	0,8
96	T-21	19,58	4,0	5,7	3	47	4	1,8	18	1,4	1,3	0,4	55	0,5	0,8
97	T-21	18,87	4,2	5,5	1	55	4	1,4	19	1,6	0,2	0,1	96	0,4	0,6
98	T-21	17,35	4,0	5,7	3	47	4	1,8	16	1,9	1,2	0,4	66	0,5	0,8

Continua...

APÊNDICE 5 – RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO E PRODUTIVIDADE (IS_7) DAS PARCELAS AMOSTRADAS EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL.

Parcela	Talhão	IS_7	Fe ⁺²	CTCef	H+Al	CTCpot	H ⁺	V	Sat,Ca	Sat,Mg	Sat,Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
			% m,v ⁻¹	cmol _c ,dm ⁻³			%			ad				
1	T-01	20,46	0,09	3,6	6,9	8,6	5,0	19,7	33,1	11,0	52,5	3,0	17,1	5,7
2	T-02	19,87	0,04	2,8	4,4	6,1	3,3	26,2	42,4	10,6	38,8	4,0	15,0	3,8
3	T-02	21,13	0,06	2,1	4,9	5,5	3,5	9,3	14,6	4,9	68,0	3,0	3,0	1,0
4	T-03	20,29	0,05	2,9	6,9	7,6	4,7	7,0	10,4	3,5	76,1	3,0	2,7	0,9
5	T-03	20,88	0,07	2,8	5,5	6,7	3,9	12,9	17,8	7,1	57,0	2,5	3,3	1,3
6	T-03	18,67	0,08	2,0	4,9	5,5	3,5	11,5	19,9	5,0	69,7	4,0	3,6	0,9
7	T-04	19,17	0,06	2,4	5,5	6,2	3,9	8,5	12,7	4,2	67,8	3,0	2,5	0,8
8	T-04	18,96	0,08	2,5	5,5	6,4	3,9	8,6	11,9	4,0	63,7	3,0	2,3	0,8
9	T-04	20,19	0,10	3,2	7,7	8,7	5,5	6,4	9,5	3,2	69,8	3,0	2,1	0,7
10	T-04	17,26	0,05	3,0	4,9	6,7	3,7	24,3	40,5	10,1	40,5	4,0	12,0	3,0
11	T-04	19,57	0,07	3,1	4,4	6,3	3,2	25,9	38,8	9,7	38,8	4,0	10,9	2,7
12	T-09	16,88	0,05	1,6	4,4	4,8	3,2	8,5	12,4	6,2	74,4	2,0	2,5	1,3
13	T-10	18,50	0,08	2,4	5,5	6,5	4,1	8,0	12,4	4,1	57,8	3,0	3,0	1,0
14	T-10	19,00	0,06	1,5	3,9	4,5	3,0	9,5	13,5	6,7	60,7	2,0	2,0	1,0
15	T-10	17,53	0,06	1,9	4,9	5,5	3,6	8,1	10,3	5,2	67,2	2,0	1,5	0,8
16	T-10	20,32	0,07	1,9	4,9	5,8	3,9	11,2	20,9	5,2	52,3	4,0	3,1	0,8
17	T-12	19,01	0,04	1,5	3,9	4,4	2,9	8,9	13,0	6,5	65,2	2,0	2,5	1,3
18	T-12	19,26	0,07	2,2	4,9	5,5	3,3	8,1	9,1	4,5	72,7	2,0	1,7	0,8
19	T-19	18,22	0,08	3,4	4,4	6,3	3,0	25,7	35,7	8,9	41,6	4,0	12,0	3,0
20	T-19	19,53	0,06	3,1	3,5	5,4	2,3	31,7	41,7	9,6	38,5	4,3	14,4	3,3
21	T-19	19,29	0,07	3,5	4,9	6,6	3,2	24,7	34,8	8,7	49,3	4,0	13,3	3,3
22	T-19	18,87	0,05	3,1	4,9	6,5	3,4	23,4	35,4	9,6	48,2	3,7	11,0	3,0
23	T-20	20,79	0,04	3,2	3,9	5,7	2,6	31,7	38,1	15,9	41,2	2,4	12,0	5,0
24	T-22	18,92	0,04	2,0	4,4	5,0	3,1	11,1	15,3	5,1	66,4	3,0	2,1	0,7
25	T-22	17,04	0,08	1,8	5,5	5,9	4,1	6,8	10,9	5,5	76,3	2,0	2,5	1,3
26	T-22	19,19	0,07	2,1	6,2	7,0	4,9	9,9	14,1	4,7	61,1	3,0	1,3	0,4
27	T-22	18,10	0,07	2,1	5,5	6,3	4,2	8,6	14,0	4,7	60,6	3,0	2,3	0,8
28	T-23	20,02	0,06	2,3	6,9	7,6	5,3	8,2	17,7	4,4	70,8	4,0	4,0	1,0
29	T-23	19,95	0,06	2,2	4,9	5,7	3,5	12,5	23,0	4,6	64,3	5,0	5,6	1,1
32	T-02	20,69	0,07	3,7	8,7	10,3	6,7	16,2	30,1	10,9	54,6	2,8	6,9	2,5
33	T-07	19,67	0,07	2,3	6,2	6,9	4,6	9,1	12,9	4,3	68,8	3,0	1,4	0,5
38	T-08	21,17	0,08	2,2	5,5	6,1	4,0	8,2	13,9	4,6	69,5	3,0	3,3	1,1
39	T-09	19,81	0,06	2,8	4,9	5,7	2,9	10,7	14,4	3,6	72,0	4,0	4,4	1,1
40	T-09	17,75	0,08	3,2	10,9	11,5	8,3	5,1	9,5	3,2	82,0	3,0	1,8	0,6
41	T-09	20,11	0,07	1,7	4,9	5,6	3,9	10,4	18,0	6,0	60,0	3,0	1,9	0,6
42	T-09	18,47	0,10	2,0	6,2	6,8	4,8	8,9	19,9	5,0	69,8	4,0	5,0	1,3
43	T-10	20,03	0,07	2,2	5,5	6,2	4,0	7,7	9,0	4,5	67,4	2,0	1,3	0,6
44	T-11	20,42	0,09	2,1	4,9	5,7	3,6	10,1	14,3	4,8	62,0	3,0	2,1	0,7
45	T-11	18,16	0,08	2,0	4,4	5,3	3,4	8,6	10,1	5,1	50,7	2,0	1,4	0,7
46	T-11	19,59	0,12	2,5	6,9	7,7	5,2	11,8	24,0	8,0	68,0	3,0	6,7	2,2
47	T-12	19,69	0,05	2,2	4,9	6,0	3,8	14,9	26,9	9,0	49,3	3,0	8,6	2,9
48	T-12	19,77	0,10	2,2	4,9	5,6	3,4	7,1	4,5	4,5	67,6	1,0	0,6	0,6
49	T-12	19,92	0,12	3,5	7,7	8,7	5,1	10,8	17,1	5,7	74,1	3,0	5,5	1,8
50	T-13	19,33	0,08	2,3	6,2	7,0	4,8	8,0	13,2	4,4	61,4	3,0	2,0	0,7
51	T-13	20,34	0,07	2,6	6,9	7,6	5,0	7,3	11,4	3,8	72,2	3,0	2,1	0,7
52	T-13	21,82	0,06	2,2	6,9	7,7	5,5	8,6	17,8	4,5	62,3	4,0	2,7	0,7
53	T-14	17,24	0,12	2,7	6,9	7,7	5,0	9,6	18,4	3,7	69,8	5,0	5,0	1,0

Continua...

APÊNDICE 5 – RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO E PRODUTIVIDADE (IS_7) DAS PARCELAS AMOSTRADAS EM PLANTIOS COMERCIAIS DE ACÁCIA NEGRA, EM TRÊS DIFERENTES IDADES, NO MUNICÍPIO DE CRISTAL, RIO GRANDE DO SUL.

Parcela	Talhão	IS_7	Fe ⁺²	CTCef	H+Al	CTCpot	H ⁺	V	Sat,Ca	Sat,Mg	Sat,Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
			% m,v ⁻¹	cmol _c ,dm ⁻³			%			ad				
54	T-14	17,89	0,07	2,2	6,2	6,7	4,6	6,1	9,2	4,6	73,3	2,0	2,2	1,1
55	T-16	19,87	0,07	2,5	6,2	6,7	4,3	7,8	12,0	4,0	76,2	3,0	3,0	1,0
56	T-18	19,00	0,09	4,0	6,2	8,4	4,4	23,7	34,6	9,9	44,5	3,5	8,2	2,4
57	T-18	18,83	0,07	3,7	6,2	8,1	4,4	20,9	32,0	8,0	48,1	4,0	6,7	1,7
58	T-18	18,66	0,07	2,3	5,5	6,5	4,2	10,5	17,2	4,3	55,8	4,0	2,4	0,6
59	T-19	19,70	0,06	2,9	3,9	5,5	2,6	26,0	34,7	10,4	45,1	3,3	10,0	3,0
60	T-19	20,81	0,10	3,5	6,9	8,7	5,2	19,1	34,3	8,6	48,6	4,0	8,0	2,0
61	T-19	20,57	0,06	3,1	4,9	6,6	3,5	23,0	38,8	6,5	45,3	6,0	12,0	2,0
62	T-20	19,88	0,06	3,6	6,2	8,2	4,6	21,6	33,3	11,1	44,4	3,0	9,2	3,1
63	T-20	18,23	0,08	3,4	4,9	6,8	3,5	24,3	32,8	11,9	41,7	2,8	7,9	2,9
64	T-20	19,24	0,07	3,4	8,7	10,5	7,1	16,0	32,2	11,7	46,8	2,8	6,9	2,5
65	T-21	18,88	0,06	3,2	3,9	6,1	2,9	26,7	34,0	12,4	30,9	2,8	10,0	3,6
66	T-21	19,34	0,08	4,1	8,7	10,8	6,7	18,2	29,4	12,2	49,0	2,4	5,0	2,1
67	T-21	18,83	0,09	2,5	6,2	7,1	4,6	10,6	19,7	3,9	63,1	5,0	3,8	0,8
68	T-22	19,15	0,07	2,2	5,5	6,4	4,2	9,7	18,4	4,6	59,7	4,0	4,0	1,0
69	T-22	18,40	0,05	2,2	5,5	6,4	4,2	10,2	18,3	4,6	59,4	4,0	3,1	0,8
70	T-22	20,41	0,05	2,9	3,9	5,7	2,9	28,5	38,5	14,0	35,0	2,8	9,2	3,3
71	T-23	20,25	0,08	2,3	4,4	5,4	3,2	12,1	17,6	4,4	52,9	4,0	2,9	0,7
72	T-23	17,34	0,13	2,3	6,9	7,6	5,3	7,6	13,0	4,3	69,3	3,0	1,9	0,6
73	T-23	19,85	0,60	2,4	4,9	6,0	3,6	12,7	20,7	4,1	53,7	5,0	3,8	0,8
74	T-07	20,20	0,10	2,6	6,2	7,0	4,4	8,0	11,5	3,8	69,3	3,0	2,1	0,7
76	T-08	19,09	0,10	2,5	6,9	7,6	5,1	7,1	12,0	4,0	71,8	3,0	2,3	0,8
77	T-11	22,08	0,07	2,1	4,9	5,7	3,6	9,9	14,3	4,8	62,0	3,0	2,1	0,7
78	T-11	18,14	0,08	2,1	4,4	5,2	3,1	8,2	9,3	4,7	60,6	2,0	1,8	0,9
79	T-12	21,82	0,09	3,1	5,5	7,0	4,0	19,0	29,5	9,8	49,2	3,0	8,2	2,7
80	T-13	21,69	0,08	2,3	5,5	6,2	4,0	8,9	13,3	4,4	66,4	3,0	2,5	0,8
81	T-13	20,63	0,10	2,9	6,2	7,2	4,3	11,9	17,2	6,9	65,4	2,5	4,2	1,7
82	T-13	22,21	0,08	2,6	7,7	8,6	5,9	6,6	11,3	3,8	67,9	3,0	2,1	0,7
83	T-14	19,77	0,10	1,8	6,9	7,4	5,6	4,5	5,7	5,7	73,9	1,0	0,9	0,9
84	T-14	18,81	0,12	3,3	6,9	8,1	4,8	10,7	15,4	6,1	64,5	2,5	4,5	1,8
85	T-16	18,08	0,07	3,4	7,7	9,2	5,8	13,1	23,8	6,0	56,6	4,0	4,7	1,2
86	T-16	19,99	0,09	3,9	9,7	10,6	6,7	6,4	10,3	2,6	77,4	4,0	2,5	0,6
87	T-17	18,52	0,05	3,3	4,9	6,8	3,5	24,2	33,0	12,0	41,9	2,8	7,9	2,9
88	T-17	18,05	0,11	4,5	6,2	9,3	4,9	29,7	42,4	15,6	29,0	2,7	13,6	5,0
89	T-17	19,40	0,10	2,4	6,9	7,6	5,2	6,7	12,3	4,1	69,9	3,0	3,3	1,1
90	T-18	19,54	0,06	3,6	7,7	9,6	5,9	17,8	32,9	8,2	49,4	4,0	6,3	1,6
91	T-18	17,43	0,08	2,7	6,9	7,7	5,0	8,5	14,9	3,7	70,7	4,0	2,9	0,7
92	T-20	19,51	0,12	4,2	7,7	10,1	5,8	20,3	33,1	9,5	44,9	3,5	6,1	1,7
93	T-20	19,15	0,08	2,4	5,5	6,3	3,9	8,7	12,5	4,2	66,5	3,0	2,3	0,8
94	T-21	18,13	0,09	2,2	4,9	5,9	3,7	9,2	13,6	4,5	54,3	3,0	2,3	0,8
95	T-21	17,76	0,09	3,1	9,7	10,7	7,5	7,3	16,0	3,2	70,6	5,0	3,1	0,6
96	T-21	19,58	0,06	3,4	6,2	8,2	4,8	22,5	38,0	11,7	40,9	3,3	10,8	3,3
97	T-21	18,87	0,08	2,4	7,7	8,5	6,1	5,3	8,4	4,2	67,0	2,0	1,4	0,7
98	T-21	17,35	0,06	3,9	6,2	8,1	4,3	21,4	31,1	10,4	49,2	3,0	10,0	3,3

Em que: ad = adimensional.

